

Université de Nancy — Faculté des Sciences

~~~~~

# THÈSES

présentées

à la Faculté des Sciences de Nancy

pour obtenir

le titre de Docteur de l'Université de Nancy

Mention Sciences

par

**René-Marcel FICHTER**

Ingénieur-Electricien de l'Université de Nancy, Licencié en Droit

---

PREMIÈRE THÈSE : Contribution à l'Étude des Compteurs d'Electricité :  
le "Facteur organique" et sa mesure.

DEUXIÈME THÈSE : Proposition donnée par la Faculté.

---

Soutenues le 12 Juin 1924

Président : M. VOGT

Examineurs { M. GUTTON  
                  { M. MAUDUIT



EDITEUR

12, Place de Laborde, 12  
PARIS (VIII<sup>e</sup>)



Université de Nancy — Faculté des Sciences

---

# THÈSES

présentées

à la Faculté des Sciences de Nancy

pour obtenir

le titre de Docteur de l'Université de Nancy

Mention Sciences

par

**René-Marcel FICHTER**

Ingénieur-Electricien de l'Université de Nancy, Licencié en Droit

---

PREMIÈRE THÈSE : **Contribution à l'Etude des Compteurs d'Electricité :**  
le "Facteur organique" et sa mesure.

DEUXIÈME THÈSE : **Proposition donnée par la Faculté.**

---

Soutenues le 12 Juin 1924

Président : M. VOGT

Examinateurs { M. GUTTON  
M. MAUDUIT



EDITEUR

12, Place de Laborde, 12  
PARIS (VIII<sup>e</sup>)

# Université de Nancy - Faculté des Sciences

---

*Doyen* : M. PETIT

*Assesseur* : M. GAIN

*Professeurs honoraires* : MM. HALLER, BLONDIOT, CARTAN, BLAISE,  
LE MONNIER, THOULET, MULLER.

*Chargé de cours honoraire* : M. MILLOT



## *Professeurs :*

|                   |                                   |
|-------------------|-----------------------------------|
| MM. PETIT.....    | Chimie agricole.                  |
| VOGT.....         | Mathématiques appliquées.         |
| GUNTZ.....        | Chimie minérale.                  |
| CUÉNOT.....       | Zoologie.                         |
| N.....            | Chimie.                           |
| GAIN.....         | Botanique.                        |
| GUTTON.....       | Physique.                         |
| COURTOT.....      | Chimie tinctoriale.               |
| HUSSON.....       | Mécanique rationnelle.            |
| MAUDUIT.....      | Electrotechnique.                 |
| FALLOT.....       | Géologie.                         |
| LEAU.....         | Calcul différentiel et intégral.  |
| BOURION.....      | Chimie physique et Electrochimie. |
| DARMOIS (E.)..... | Physique.                         |
| VAVON.....        | Chimie organique.                 |
| TRAVERS.....      | Chimie industrielle.              |
| LONGCHAMBON.....  | Minéralogie et cristallographie.  |
| DARMOIS (G.)..... | Analyse supérieure.               |
| BOUIN.....        | Zoologie appliquée.               |
| CROZE.....        | Physique.                         |
| GRUMBACH.....     | Physique.                         |

## *Chargés de Cours :*

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| MM. CORNUBERT..... | Chimie.            |
| JOLY.....          | Géologie lorraine. |

## *Maîtres de Conférences :*

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| MM. RAYBAUD..... | Botanique.           |
| MENTRÉ.....      | Mécanique appliquée. |

*Secrétaire* : M. BERTRAND.

A MA MÈRE

A MA FEMME

*en témoignage d'affection*

M.-R. F.



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41555808\\_0009](https://archive.org/details/IA41555808_0009)

A mes anciens Maîtres de l'Institut électrotechnique  
et de la Faculté des Sciences de Nancy

*Hommage reconnaissant*

M.-R. Fichter.

*Février 1922-Janvier 1924.*



## PREMIÈRE THÈSE

---

# Contribution à l'étude des compteurs d'électricité

### Le « facteur organique » des compteurs et sa mesure

---

**I. Introduction.** — On sait que les compteurs-moteurs modernes se composent d'un induit (disque ou enroulement) tournant sous ou à l'intérieur d'électro-aimants ou de bobines inductrices. Sauf dans le cas particulier du compteur O.K., tous les appareils sont munis d'un frein magnétique constitué par un ou plusieurs aimants permanents dans l'entrefer desquels tourne un disque de cuivre ou d'aluminium.

Le mouvement de l'induit est transmis à un mécanisme totaliseur (à aiguilles, à rouleaux ou à chiffres sauteurs) généralement au moyen d'une vis sans fin et d'une roue tangente.

Pour que le compteur soit exact, il faut qu'à chaque instant, et dans toute l'étendue de son échelle d'enregistrement, la vitesse de l'induit soit proportionnelle à la puissance à mesurer. Or, la constance de cette proportionnalité, facile à obtenir pour des charges relativement importantes, n'existe plus aux très faibles régimes, les frottements des organes en rotation venant influencer la marche de l'appareil.

Les constructeurs se sont évidemment efforcés de réduire le rôle perturbateur des frottements.

Dans les compteurs ampèreheuremètres à courant continu, on a recours à ce qu'on a appelé le « compoundage », c'est-à-dire que l'on fait passer d'une façon permanente dans l'induit du compteur un courant d'une intensité déterminée et réglé de telle façon qu'il crée un couple actif légèrement supérieur à la somme des frottements du système au départ, puis, comme le compteur aurait ainsi tendance à tourner à vide, on empêche la marche à vide à l'aide d'une goupille d'arrêt ou de tout autre dispositif approprié.

Dans les compteurs wattheuremètres, on a également employé de petites bobines inductrices auxiliaires, dites bobines de compensation, dont le but est de créer, de même, un couple actif supplémentaire destiné à contrebalancer l'influence des frottements au démarrage.

Enfin, toujours dans les appareils à courant continu, on a eu recours à des artifices tels que : les moteurs

auxiliaires de démarrage, les balais oscillants, etc... Tous ces procédés ont l'inconvénient d'être coûteux et de consommer du courant; très ingénieux au demeurant, leur champ d'application est cependant limité aux compteurs de gros calibres.

Dans les compteurs à induction pour courants alternatifs, on crée le couple de compensation en provoquant une dyssymétrie du champ de tension, et on annule l'excès de couple actif, susceptible de provoquer la marche à vide, au moyen d'un ergot d'arrêt ou encore à l'aide de trous ou de fentes ménagés dans le disque-induit, ce qui a d'ailleurs l'inconvénient d'altérer l'exactitude du compteur aux régimes de faible charge.

C'est sur les appareils à induction, qui, de par leur principe même, sont simples et peu coûteux, qu'a surtout porté l'effort des constructeurs. La création des lampes à faible consommation, des appareils tels que les transformateurs de sonnerie, etc... ont amené les distributeurs de courant à exiger des constructeurs des appareils de plus en plus précis et de plus en plus sensibles. Pour réaliser l'exactitude aux très faibles charges (les règlements administratifs français exigeant le démarrage pour  $1/200$  de la charge nominale), on a d'abord, tout naturellement, songé à accroître la valeur du couple moteur, pensant ainsi diminuer l'importance relative des couples de frottement.

Cet accroissement du couple moteur était évidemment chose facile à réaliser en augmentant le diamètre ou l'épaisseur du disque-induit, ou la consommation des enroulements. En combinant ces moyens, on peut augmenter le couple actif dans des proportions très notables; aussi durant ces dernières années a-t-on assisté, dans le monde des compteurs, à une véritable surenchère, et c'est à qui pourrait offrir le couple moteur de moment le plus élevé : on est ainsi passé rapidement, pour les appareils à induction, de 2 à 3 cm-g à 6 et même 8 cm-g.

Or, à part quelques exceptions honorables, nous devons constater que ni la sensibilité au démarrage ni

l'exactitude des compteurs ne s'en sont trouvées améliorées, et l'explication de ceci résulte du fait que les constructeurs n'ont, en général, pas pris garde qu'en augmentant le couple moteur ils ont, le plus souvent, augmenté en même temps la somme des couples de frottement.

Nous devons dire d'ailleurs que l'on a songé à réduire l'influence des couples de frottement au moyen d'artifices spéciaux tels que : suspensions vibrantes, etc..., mais ici, encore, l'accroissement du prix de revient a très vite limité l'emploi de ces appareils.

Au lieu d'accroître le couple moteur, certains constructeurs se sont orientés dans une autre voie. Sachant que les compteurs à couple actif faible et à vitesse de régime réduite (autrement dit à constante élevée), permettent des courbes d'erreurs plus tendues, ils ont cherché l'augmentation de la sensibilité dans la diminution des couples de frottement.

Dans cet ordre d'idées, Stanley, aux Etats-Unis, a proposé de suspendre magnétiquement le disque-induit, qui n'est plus alors guidé que par un fil ; il arrive ainsi à annuler presque complètement les frottements dus aux pivots et à réaliser le démarrage sous une charge très réduite. Cependant, cet artifice, pour intéressant qu'il soit, présente entre autres l'inconvénient d'un prix de revient élevé.

Nous nous sommes proposé, dans ce travail, d'étudier en détail les couples de frottement développés dans les compteurs d'électricité et de vérifier qu'il est facile de les réduire dans une proportion telle qu'il devienne possible de réaliser des compteurs à couple actif relativement faible, mais présentant cependant une grande sécurité de marche.

**II. Définition du facteur organique.** — De l'étude d'un très grand nombre de types de compteurs, nous avons conclu à l'insuffisance des essais actuellement pratiqués pour définir les qualités d'un compteur, et nous avons été amené à proposer, comme nouveau critérium, le rapport

$$F = \frac{C_m}{\sum C_f} = \frac{\text{Couple moteur}}{\text{Somme des couples de frottement}}$$

rapport auquel nous avons donné le nom de « facteur organique ».

Il est évident que l'on peut déterminer la valeur du facteur organique pour les différents régimes de charge du compteur.

**III. Mesure du couple moteur.** — La mesure du couple moteur,  $C_m$ , est aujourd'hui une opération courante : les différents dynamomètres à torsion (modèle Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft, modèle Landis et Gyr, etc...), le dispositif de M. Delatour, employé à l'Institut de Nancy, le dynamomètre à fils de Schmiedel, le dispositif enregistreur d'Alberti pour les compteurs à courant continu, permettent une mesure facile de ce couple.

**IV. Mesure des couples de frottement.** — La mesure de la somme des couples de frottement, par contre, n'a pas encore été étudiée d'une façon complète et méthodique.

Les couples freinants d'origine mécanique (autrement dit les couples de frottement) sont :

1° Le frottement de pivotement de la masse en rotation sur la crapaudine (acier trempé sur rubis ou sur saphir) ;

2° Le frottement de l'arbre dans le palier supérieur (généralement acier sur duralumin ou sur laiton) ;

3° Le frottement de l'air sur le disque ou sur l'induit et la réaction des parois de la cage et des électroaimants inducteurs sur l'air brassé par ce disque ou par cet induit, réaction à laquelle on peut ajouter le frottement supplémentaire dû au laminage de l'air dans l'entrefer du ou des aimants amortisseurs.

4° Les frottements des engrenages de la minuterie et la réaction de la roue tangente sur la vis sans fin de l'arbre (laiton contre laiton ou laiton contre acier).

5° Dans les compteurs à courant continu le frottement des balais sur le collecteur.

Nous ne nous occuperons pas ici des couples freinants d'origine électromagnétique, ceux-ci ayant été étudiés par divers auteurs.

Les frottements développés dans les compteurs n'ont guère été étudiés que par Fitch et Huber aux Etats-Unis et par Schmiedel en Allemagne, Schmiedel ayant notamment déterminé les frottements dus aux balais et à la minuterie dans un compteur à courant continu, mais aucun de ces auteurs n'a fait la séparation complète des différents couples de frottement ni dégagé les lois auxquels ils obéissent.

Nous allons voir qu'il est possible de mesurer séparément chacun des couples, soit directement, soit indirectement, et d'en déduire des conclusions pratiques en vue de l'amélioration de la construction des compteurs.

**1. Frottement de pivotement.** — Les pivots des compteurs sont généralement terminés par une partie hémisphérique en acier, polie, reposant sur une crapaudine en saphir ou en rubis (naturel ou artificiel) à creusure ronde. Nous admettrons, dans ce qui va suivre, que l'on rentre ainsi dans le cas du pivotement d'une bille homogène dans une cavité de révolution, de sorte que nos conclusions s'appliqueront de même aux compteurs munis de crapaudines à bille.

Léauté a montré<sup>(1)</sup> que le moment du couple de frottement de pivotement était proportionnel à la charge, au coefficient de frottement et à la longueur de l'ellipse limitant l'aire de contact entre le pivot et la crapaudine.

Si nous désignons par  $C_f$ , cette partie du moment du couple de frottement, on peut écrire ( $f$  étant le coefficient de frottement ;  $L$ , la longueur de l'ellipse de contact et  $P$ , la charge du pivot)

$$C_f = k f L P.$$

(1) Thèse de doctorat, 1876.

Hertz, postérieurement aux recherches de Léauté, est arrivé à des conclusions semblables tout en trouvant, pour le coefficient  $k$ , une valeur d'environ 10 pour 100 plus grande que celle indiquée par Léauté. C'est cette valeur de  $k = 0,093$  que nous admettrons dans nos calculs, bien qu'elle nous conduise à des nombres un peu supérieurs à ceux trouvés expérimentalement<sup>(1)</sup>.

Nous nous proposons d'abord, dans une première série d'expériences, de vérifier si la formule de Hertz peut s'appliquer aux frottements de pivotement développés sur les crapaudines des compteurs.

En enlevant l'aimant amortisseur et la minuterie, nous pouvons mesurer directement la valeur des couples de frottement dus à l'air et aux pivots. Pour cette mesure nous emploierons uniquement la méthode d'amortissement.

Si nous lançons l'induit du compteur avec une vitesse un peu supérieure à sa vitesse de régime et que nous l'abandonnions ensuite à lui-même, aucun courant ne traversant l'appareil, la vitesse du système s'amortira et, si nous désignons par  $K$  le moment d'inertie de la masse en rotation et par  $\omega$  sa vitesse angulaire, on a à chaque instant

$$C_t = K \frac{d\omega}{dt},$$

où  $C_t$  correspond aux pertes par frottement.

Si nous enlevons le palier supérieur, l'induit se tenant en équilibre sur sa crapaudine comme une simple toupie,  $C_t$  sera alors la somme des couples dus aux frottements du palier inférieur et à l'air, mais en réalité ce mode opératoire par différence n'est applicable que très rarement et nous verrons plus loin comment on peut, indirectement, déterminer les pertes dues au palier supérieur.

a) DÉTERMINATION DU MOMENT D'INERTIE. — Prenons le cas d'un induit de compteur à induction (la méthode s'applique bien entendu de même aux induits des compteurs à courant continu). Nous suspendrons l'induit par son axe à un fil d'acier homogène de 3 m de longueur environ et de 0,2 mm de diamètre, l'accrochage étant réalisé à l'aide d'une petite pince dont le moment d'inertie est absolument négligeable (la pince employée ayant 2 mm de diamètre et ne pesant que 60 milligrammes). On trace au crayon un trait repère sur l'induit et, à l'aide d'une lampe à incandescence et d'un fil tendu, on s'arrange pour obtenir sur cet induit une ombre portée du fil permettant, en considérant le système comme un balancier à torsion, de noter, à l'aide du passage du trait de crayon devant l'ombre portée, la durée d'un certain nombre d'oscillations du système. On recommence l'opération en ajoutant à l'induit un disque très mince de moment d'inertie connu.

Cette méthode, toute classique, permet de déterminer  $K$  au moyen de la formule :

$$K = K_d \frac{t_1^2}{t_2^2 - t_1^2},$$

où  $K_d$  est le moment d'inertie calculé du disque additionnel et  $t_1$  et  $t_2$ , les périodes d'oscillation du système avant et après la surcharge du disque.

La méthode ne présente aucune difficulté d'application ; il faut cependant avoir soin de ne considérer que des oscillations de faible amplitude et surtout de n'employer qu'un disque extra-mince et léger. Pour augmenter la précision des mesures, on comptera un très grand nombre d'oscillations.

Pour nos mesures, nous nous sommes servi d'un disque en alliage d'aluminium de 3,980 cm de rayon, percé d'une ouverture centrale de 1,095 cm de rayon et dont l'épaisseur est de 0,067 cm.

Le moment d'inertie de ce disque est égal, en adoptant le système C. G. S., à

$$\frac{\pi d \times 0,067}{2} (3,980^4 - 1,095^4),$$

où  $d$  représente la densité de l'aluminium employé.

La masse du disque étant de 7,710 g, cette densité est égale à 2,493.

On a donc, en définitive, pour le moment d'inertie du disque additionnel la valeur

$$K_d = 65,9 \text{ g-cm}^2.$$

b) DÉTERMINATION DE  $\frac{d\omega}{dt}$ . — Il est évident que, dans le cas d'un compteur d'électricité, on ne peut songer à employer un tachymètre ou tout autre appareil analogue.

Nous noterons donc, au moyen d'un dispositif enregistreur, les durées de chaque révolution de l'induit et nous déduirons les vitesses, à chaque instant, d'après la durée moyenne d'une révolution à l'instant considéré.

Il va de soi que nous n'obtiendrons que des vitesses moyennes et non des vitesses instantanées, mais la précision sera toujours suffisante pour nous permettre de construire une courbe  $v = f(t)$  et de cette courbe déduire, par construction graphique, la valeur de  $\frac{d\omega}{dt}$  pour chaque instant.

Méthodes et appareils. — Parmi les différents dispositifs enregistreurs automatiques, nous avons examiné ceux proposés par Glatzel, d'une part, et par Krukowski, de l'autre, consistant à impressionner une cellule photoélectrique au sélénium au moyen d'un petit miroir fixé sur l'arbre de l'induit et éclairé par une lampe fixe en position : à chaque révolution du disque, le miroir réfléchit un pinceau lumineux sur la cellule de sélénium qui est intercalée dans le circuit d'un relais agissant sur le style d'un chronographe enre-

(1) Nous avons adopté la valeur donnée par Hertz principalement pour pouvoir utiliser les tables de M. Heerwagen.

gisteur. Nous avons renoncé à employer cette méthode en raison de l'action de l'air sur le miroir <sup>(1)</sup>.

Un autre dispositif d'enregistrement a été proposé par Gordon Thomson <sup>(2)</sup>; ce dernier réunit la roue tangente du compteur (ou bien l'arbre) à l'un des pôles d'une source de courant alternatif à 10000 v, l'autre pôle étant relié à une pointe fixe placée en regard du disque, qui est muni lui-même d'une pointe jouant avec la pointe fixe le rôle d'éclateur. A chaque passage de la pointe mobile devant la pointe fixe jaillit une étincelle et un relais intercalé dans le primaire de l'autotransformateur servant à alimenter le dispositif actionne le style d'un chronographe enregistreur. Cette méthode, telle que l'a préconisée G. Thomson, présente le grave inconvénient de modifier, en cours d'expérience, les frottements à mesurer parce qu'il se produit entre la vis et la roue tangente, ou entre le palier supérieur et l'arbre du disque, des séries de petites étincelles qui altèrent rapidement le métal. D'autre part, l'action électrostatique due aux étincelles donne, de même, naissance à un couple qui est loin d'être négligeable, quoi qu'en ait dit G. Thomson.

Pour rendre pratique le dispositif, nous l'avons modifié de la façon suivante : la tension d'alimentation a été abaissée à 4000 v environ; d'autre part, au lieu de réunir la source de courant à l'arbre lui-même, nous munissons cet arbre d'une petite pointe en cuivre de 0,05 mm de diamètre et de 2 mm de longueur et nous amenons, en regard, une pointe de platine fixe servant d'éclateur. Le courant à haute tension sort du disque par une pointe de cuivre de 3 mm de longueur et 0,05 mm de diamètre, la pointe fixe se trouvant en regard étant elle-même en platine et la distance d'éclatement étant réglable au moyen d'une vis micrométrique. Enfin, nous intercalons dans le circuit à haute tension un éclateur de Wien et un condensateur en dérivation; nous obtenons ainsi des décharges oscillantes qui ont l'avantage de se soufler plus rapidement et d'éviter les amorçages d'ars qui se produisent fréquemment avec le dispositif primitif de Thomson.

Il faut avoir grand soin de placer les pointes platinées fixes dans des directions rigoureusement diamétrales par rapport au disque, faute de quoi on s'expose à créer un couple supplémentaire qui peut, soit retarder le mouvement du disque, soit, au contraire, l'accélérer. On peut même, en orientant convenablement les pointes arriver à entretenir indéfiniment le mouvement du disque. En observant la précaution

<sup>(1)</sup> Il est évident que l'on peut rendre la méthode pratique en remplaçant la cellule au sélénium par une cellule au potassium et en supprimant le miroir. Le mode opératoire est alors le suivant : on noircit au noir de fumée le dessus du disque, sauf une petite portion de la périphérie de 1 cm de côté environ, portion qui sera polie soigneusement; on envoie un faisceau lumineux sur cette portion polie à l'aide d'un miroir fixe en position et le faisceau lumineux en se réfléchissant à chaque tour sur la cellule de potassium, placée dans le circuit d'un relais, actionne ainsi le chronographe enregistreur.

<sup>(2)</sup> Gordon Thomson; A new Method of Timing Watt-hour meters. *Electrical World*, février 1913, t. LXI, p. 246.

ci-dessus, on annule les actions électrostatiques au moyen de la réaction de l'arbre lui-même, mais on augmente les frottements dans le palier supérieur.

Quoi qu'il en soit et étant donnée la faible valeur des couples à mesurer, il est prudent de ne se servir de cette méthode d'enregistrement par étincelles que dans certains cas nettement définis où l'on opère par différence, et seulement pour des compteurs dont l'équipage mobile est relativement lourd.

Dans la presque totalité de nos mesures, nous nous sommes servi, pour actionner le style du chronographe enregistreur, d'un simple manipulateur Morse fermant un circuit de piles, aucun courant ne traversant les compteurs à essayer. Il faut évidemment, si l'on veut arriver à une précision suffisante dans les mesures, un certain entraînement pour noter exactement à chaque tour le passage devant un repère fixe d'un repère de couleur tracé sur le disque. D'autre part, la méthode au manipulateur n'est plus applicable avec précision dès que l'on dépasse une vitesse de un tour par seconde. Au delà, on est obligé d'utiliser le dispositif à éclateurs ou le procédé optique. Quelle que soit la méthode employée, il faut avoir soin de se préserver des perturbations extérieures. Le compteur doit être rigoureusement vertical, ce que l'on contrôlera au fil à plomb. De plus, si l'on opère sans boîtier, il faut protéger l'induit par un écran de façon que les courants d'air de la salle et, en particulier, ceux produits à courte distance par la respiration de l'observateur, ne viennent pas troubler la marche du disque. Cette précaution qui pourra sembler superflue, si l'on opère avec des équipages peu sensibles, sera de rigueur pour les induits bien suspendus. Il faut également opérer dans un lieu absolument à l'abri de toutes vibrations.

*Chronographe.* — Nous avons d'abord employé un chronographe enregistreur du commerce, mais, en raison des graves mécomptes que nous avons éprouvés du fait de cet appareil, nous avons dû étudier et réaliser un modèle spécial qui nous a permis d'évaluer les temps au 1/50<sup>e</sup> de seconde, précision très supérieure à celle nécessitée par les mesures <sup>(1)</sup>.

Nous sommes arrivé de cette façon, même dans nos expériences au manipulateur, à avoir pour plusieurs dizaines d'essais répétés, des résultats comparables à moins de 3 pour 100 près dans les cas les plus défavorables (amortissements rapides).

Afin de déterminer la loi des variations du couple de frottement avec le poids de l'équipage mobile, nous avons fait construire une série de disques de même diamètre et de différentes épaisseurs et nous leur avons appliqué la méthode de mesure par amortissement <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> La réalisation d'un mouvement circulaire uniforme était, d'autre part, indispensable pour la mise au point de notre méthode optique pour l'étalonnage des compteurs.

<sup>(2)</sup> Afin de permettre la vérification expérimentale du calcul des frottements dus aux paliers supérieurs, les disques des séries D ont été conçus de telle façon que leur centre de gravité se trouve placé au-dessous du point de pivotement, de façon qu'ils puissent rester en équilibre sans le secours du palier supérieur ou contre pivot.

Les résultats obtenus sont indiqués dans les tableaux suivants et nous donnons ci-contre la reproduction d'un

diagramme de la série D<sub>4</sub>, le tracé de l'enregistreur ayant été doublé d'un trait à l'encre de Chine

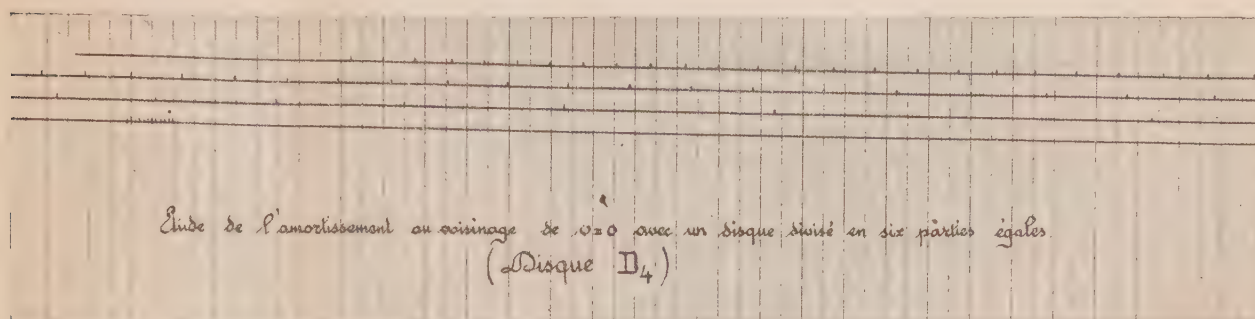


Fig. 1. — Relevé d'un diagramme au chronographe enregistreur.

pour en permettre la reproduction photographique (fig. 1).

ESSAI N° 1. — Disque D<sub>1</sub>, en aluminium. Poids, 12,619 g; diamètre, 80 mm; épaisseur 0,85 mm.

Calcul du moment d'inertie. — Période d'oscillation propre,  $t_1 = 4,84$  s.

Période d'oscillation avec disque additionnel,  $t_2 = 6,42$  s.

$$K_{D_1} = 65,9 \frac{(4,84)^2}{(6,42)^2 - (4,84)^2} = 85 \text{ g-cm}^2.$$

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,74                              |
| 10                     | 0,69                              |
| 20                     | 0,606                             |
| 30                     | 0,556                             |
| 40                     | 0,476                             |
| 50                     | 0,435                             |
| 60                     | 0,370                             |
| 70                     | 0,323                             |
| 80                     | 0,275                             |
| 90                     | 0,233                             |
| 100                    | 0,204                             |
| 110                    | 0,161                             |
| 120                    | 0,142                             |
| 182                    | 0                                 |

Pour pouvoir tracer la courbe pour des vitesses voisines de zéro et augmenter la précision du tracé, nous avons répété l'expérience en marquant sur la circonférence du disque 6 traits-repère équidistants. — On a ainsi pour D<sub>1</sub> le tableau suivant limité à la portion utile de la courbe et se raccordant à la courbe précédente par un déplacement d'origine.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,116                             |
| 5                      | 0,104                             |
| 10                     | 0,0925                            |
| 15                     | 0,080                             |
| 20                     | 0,068                             |
| 30                     | 0,047                             |
| 41                     | 0,02                              |
| 52                     | 0                                 |

ESSAI N° 2 (1). — Disque D<sub>2</sub>, en aluminium. Poids, 14,87 g; diamètre, 80 mm; épaisseur, 1 mm.

Calcul du moment d'inertie. — Période d'oscillation propre,  $t_1 = 5,24$  s.

Période d'oscillation avec disque additionnel,  $t_2 = 6,74$  s.

$$K_{D_2} = 65,9 \frac{5,24^2}{6,74^2 - 5,24^2} = 101 \text{ g-cm}^2.$$

| Temps.<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 0                       | 1,00                              |
| 10                      | 0,91                              |
| 20                      | 0,85                              |
| 30                      | 0,78                              |
| 40                      | 0,714                             |
| 50                      | 0,666                             |
| 60                      | 0,60                              |
| 70                      | 0,552                             |
| 80                      | 0,51                              |
| 90                      | 0,465                             |
| 100                     | 0,428                             |
| 110                     | 0,38                              |
| 120                     | 0,35                              |
| 130                     | 0,314                             |
| 140                     | 0,28                              |
| 150                     | 0,256                             |
| 160                     | 0,224                             |
| 170                     | 0,198                             |
| 180                     | 0,17                              |
| 190                     | 0,146                             |
| 200                     | 0,126                             |
| 263                     | 0                                 |

Tracé de la courbe au voisinage de  $v = 0$  :

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,102                             |
| 5                      | 0,0902                            |
| 10                     | 0,083                             |
| 15                     | 0,077                             |
| 20                     | 0,058                             |
| 33                     | 0,031                             |
| 40                     | 0,021                             |
| 50                     | 0                                 |

(1) L'état du pivot et de la crapaudine est vérifié au microscope avant et après chaque expérience.

ESSAI N° 3. — Disque D<sub>3</sub>, en aluminium. Poids, 8,60 g; diamètre, 80 mm; épaisseur, 0,58 mm.

Calcul du moment d'inertie. — Période d'oscillation propre,  $t_1 = 4,04$  s.

Période d'oscillation avec disque additionnel,  $t_2 = 5,92$  s.

$$K_{D_3} = 65,9 \times \frac{(4,04)^2}{(5,92)^2 - (4,04)^2} = 57,4 \text{ g-cm}^2.$$

| Temps<br>(en secondes). | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 0                       | 1,00                              |
| 10                      | 0,90                              |
| 20                      | 0,80                              |
| 30                      | 0,69                              |
| 40                      | 0,606                             |
| 50                      | 0,526                             |
| 60                      | 0,44                              |
| 70                      | 0,37                              |
| 80                      | 0,333                             |
| 90                      | 0,295                             |
| 100                     | 0,253                             |
| 109                     | 0,212                             |
| 120                     | 0,179                             |
| 133                     | 0,126                             |
| 186                     | 0                                 |

Tracé de la courbe au voisinage de  $v = 0$ .

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,083                             |
| 5                      | 0,076                             |
| 10                     | 0,066                             |
| 17                     | 0,054                             |
| 23                     | 0,042                             |
| 32                     | 0,034                             |
| 38                     | 0,014                             |
| 43                     | 0                                 |

ESSAI N° 4. — Disque D<sub>4</sub>, en aluminium. Poids, 23,52 g; diamètre, 83 mm; épaisseur, 1,60 mm.

Calcul du moment d'inertie. — Période d'oscillation propre,  $t_1 = 7,19$  s.

Période d'oscillation avec disque additionnel,  $t_2 = 8,39$  s.

$$K_{D_4} = 65,9 \times \frac{(7,19)^2}{(8,39)^2 - (7,19)^2} = 182,5 \text{ g-cm}^2.$$

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,95                              |
| 10                     | 0,89                              |
| 20                     | 0,84                              |
| 30                     | 0,80                              |
| 40                     | 0,735                             |
| 50                     | 0,685                             |
| 60                     | 0,625                             |
| 70                     | 0,59                              |
| 80                     | 0,54                              |
| 90                     | 0,50                              |
| 100                    | 0,46                              |

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par secondes) |
|------------------------|------------------------------------|
| 110                    | 0,42                               |
| 120                    | 0,385                              |
| 130                    | 0,35                               |
| 140                    | 0,31                               |
| 150                    | 0,280                              |
| 160                    | 0,25                               |
| 170                    | 0,23                               |
| 180                    | 0,205                              |
| 190                    | 0,18                               |
| 200                    | 0,15                               |
| 210                    | 0,13                               |
| 240                    | 0,053                              |
| 270                    | 0                                  |

Etude de la courbe au voisinage de  $v = 0$ . (Voir figure 1.)

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,104                             |
| 5                      | 0,0925                            |
| 10                     | 0,0764                            |
| 15                     | 0,066                             |
| 21                     | 0,0538                            |
| 29                     | 0,0328                            |
| 36                     | 0,0185                            |
| 46                     | 0                                 |

ESSAI N° 5. — Disque D<sub>5</sub>, en cuivre. Poids, 46,24 g; diamètre, 80 mm; épaisseur, 1 mm.

Calcul du moment d'inertie. — Période d'oscillation propre,  $t_1 = 9,98$  s.

Période d'oscillation avec disque additionnel,  $t_2 = 10,86$  s.

$$K_{D_5} = 65,9 \times \frac{9,98^2}{10,86^2 - 9,98^2} = 359 \text{ g-cm}^2$$

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,11                              |
| 10                     | 1,05                              |
| 20                     | 1,01                              |
| 30                     | 0,96                              |
| 40                     | 0,91                              |
| 50                     | 0,88                              |
| 60                     | 0,845                             |
| 70                     | 0,808                             |
| 80                     | 0,784                             |
| 90                     | 0,736                             |
| 100                    | 0,69                              |
| 110                    | 0,67                              |
| 120                    | 0,646                             |
| 130                    | 0,606                             |
| 140                    | 0,556                             |
| 150                    | 0,53                              |
| 160                    | 0,50                              |
| 170                    | 0,48                              |
| 180                    | 0,445                             |
| 190                    | 0,417                             |
| 200                    | 0,385                             |
| 210                    | 0,366                             |

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par secondes) |
|------------------------|------------------------------------|
| 220                    | 0,34                               |
| 230                    | 0,31                               |
| 240                    | 0,294                              |
| 250                    | 0,268                              |
| 260                    | 0,247                              |
| 270                    | 0,212                              |
| 280                    | 0,20                               |
| 290                    | 0,166                              |
| 300                    | 0,151                              |
| 310                    | 0,126                              |
| 330                    | 0,088                              |
| 363                    | 0                                  |

ESSAI N° 6. — Disque D<sub>7</sub>, en cuivre. Poids, 29,68 g; diamètre, 80 mm; épaisseur, 0,67 mm.

Calcul du moment d'inertie. — Période d'oscillation propre t<sub>1</sub> = 7,44 s.

Période d'oscillation avec disque additionnel, t<sub>2</sub> = 8,60 s.

$$K_{D_7} = 65,9 \frac{(7,44)^2}{(8,60)^2 - (7,44)^2} = 196 \text{ g-cm}^2.$$

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,78                              |
| 10                     | 0,74                              |
| 20                     | 0,667                             |
| 30                     | 0,650                             |
| 40                     | 0,588                             |
| 50                     | 0,540                             |
| 60                     | 0,500                             |
| 70                     | 0,465                             |
| 80                     | 0,417                             |
| 90                     | 0,377                             |
| 100                    | 0,333                             |
| 110                    | 0,312                             |
| 120                    | 0,274                             |
| 130                    | 0,23                              |
| 150                    | 0,172                             |
| 160                    | 0,141                             |
| 217                    | 0                                 |

Etude de la courbe au voisinage de v = 0.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,147                             |
| 5                      | 0,128                             |
| 10                     | 0,122                             |
| 15                     | 0,108                             |
| 20                     | 0,994                             |
| 25                     | 0,087                             |
| 30                     | 0,071                             |
| 37                     | 0,052                             |
| 40                     | 0,048                             |
| 60                     | 0                                 |

Pour obtenir les couples de frottement au départ des pivots, il suffit de relever sur les courbes D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, etc., par une construction graphique, la valeur du coefficient angulaire pour la vitesse v = 0.

Ce coefficient angulaire, multiplié par 2 π, donne la

valeur de  $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0$  qui, multipliée ensuite par le moment d'inertie, donne en définitive la valeur du moment du couple de frottement en centimètres-dynes. Pour obtenir sa valeur en centimètres-grammes, il suffit de diviser ce résultat par la valeur de g, soit 981 cm : s<sup>2</sup>.

Les tableaux publiés ci-dessus sont chacun la reproduction d'une moyenne de 10 à 20 diagrammes donnant des résultats concordants à ± 3 pour 100 près.

Les essais effectués, en divisant les disques en six zones égales, nous ont permis de construire des courbes à grande échelle, non reproduites dans le présent travail, et dont le tracé des tangentes aux points v = 0 nous a fourni la valeur des accélérations angulaires  $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0$  avec une précision supérieure à celle que permettraient les courbes D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, etc... Nous avons en définitive, pour les accélérations angulaires, les valeurs suivantes :

$$\text{Pour } D_1, \quad 2\pi, \frac{0,362}{182},$$

$$\text{Pour } D_2, \quad 2\pi, \frac{0,313}{162},$$

$$\text{Pour } D_3, \quad 2\pi, \frac{0,31}{170},$$

$$\text{Pour } D_4, \quad 2\pi, \frac{0,24}{120},$$

$$\text{Pour } D_5, \quad 2\pi, \frac{0,386}{163},$$

$$\text{Pour } D_7, \quad 2\pi, \frac{0,22}{91};$$

d'où les moments des couples de frottement :

Pour D<sub>1</sub>,

$$C_{f0} = \frac{2\pi}{981} \times \frac{0,362}{182} \times 85 = 0,00108 \text{ cm-g};$$

Pour D<sub>2</sub>,

$$C_{f0} = \frac{2\pi}{981} \times \frac{0,313}{162} \times 101 = 0,00125 \text{ cm-g};$$

Pour D<sub>3</sub>,

$$C_{f0} = \frac{2\pi}{981} \times \frac{0,24}{112} \times 57,4 = 0,00067 \text{ cm-g},$$

Pour D<sub>4</sub>,

$$C_{f0} = \frac{2\pi}{981} \times \frac{0,24}{120} \times 182,5 = 0,0023 \text{ cm-g};$$

Pour D<sub>5</sub>,

$$C_{f0} = \frac{2\pi}{981} \times \frac{0,386}{163} \times 359 = 0,0055 \text{ cm-g};$$

Pour  $D_7$ ,

$$C_{10} = \frac{2\pi}{981} \times \frac{0,22}{91} \times 196 = 0,0030 \text{ cm-g.}$$

Chaque terme  $C_f$  représente la somme des couples de frottement dus au pivot et au palier supérieur pour une vitesse voisine de zéro, le couple dû au palier supérieur étant d'ailleurs négligeable pour des disques parfaitement équilibrés, comme nous allons le voir plus loin.

Comme nous avons eu soin, pendant toute la durée de nos expériences, de conserver le même pivot, la même crapaudine et le même palier supérieur, toutes ces pièces étant amovibles, nous pouvons déduire des expériences précédentes, la loi de variation du couple de frottement dû au pivotement en fonction de l'accroissement du poids de l'équipage mobile.

Nous remarquerons que, si on divise le produit  $P\sqrt{P}$  par la valeur du couple trouvé dans chaque

cette loi dans toute une série d'essais non mentionnés dans le présent travail, notamment avec les disques de la série  $D_3$  dont le poids était de 59,046 g et qui ont donné un couple de 0,0074 cm-g<sup>(1)</sup>.

Ce résultat est de la plus haute importance, car il s'applique non seulement aux compteurs, mais encore à tous les appareils de mesure dont l'équipage mobile est supporté par un axe vertical pivoté.

Les Allemands désignent sous le nom de « Gütefaktor » le rapport

$$\gamma = \frac{\text{Moment du couple moteur}}{(\text{Poids du système mobile})^\alpha}$$

$\alpha$  étant pris égal à 1,5 ou même à 2, la majeure partie des auteurs allemands estimant cependant avec Keinath (Technik der elektrischen Messgeräte) que les frottements s'accroissent comme la puissance 1,5 du poids de l'équipage. Or, nous venons de voir que cet accroissement variait comme la puissance 4/3 du poids. Le « facteur de qualité » doit donc se mettre sous la forme

$$\gamma = \frac{C_m}{P^{4/3}}$$

Si nous relevons maintenant les valeurs du couple de frottement lui-même pour des vitesses appréciables (de l'ordre de 0,1 tour par seconde), nous nous apercevons que ces valeurs croissent très rapidement avec la vitesse en raison de la résistance opposée par l'air. Pour déterminer la grandeur de cette action, il suffira, pour la vitesse considérée, de retrancher du couple calculé la valeur du couple à l'origine en faisant ainsi l'hypothèse que le terme dû à la résistance de l'air est négligeable aux environs de  $\omega = 0$  et que le frottement de pivotement reste le même.

On remarquera que les allures des différentes courbes ne sont pas rigoureusement semblables. Cela tient à ce que certains des disques ( $D_1$  et  $D_2$ ) ont été munis, l'un de deux fentes, l'autre de deux trous destinés à an-

nuler la marche à vide du compteur. C'est l'action de ces fentes et trous qui intervient pour modifier la résistance opposée au mouvement par l'air.

Si maintenant, mettant notre compteur d'étude sous courant, nous déterminons la valeur du couple-moteur avec les disques  $D_1$ ,  $D_2$ , etc..., nous constatons que, en conservant le même circuit magnétique et le même

<sup>(1)</sup> Les essais sur  $D_3$  n'ont pas été poursuivis en raison de la pression trop élevée à laquelle était soumis le pivot employé.

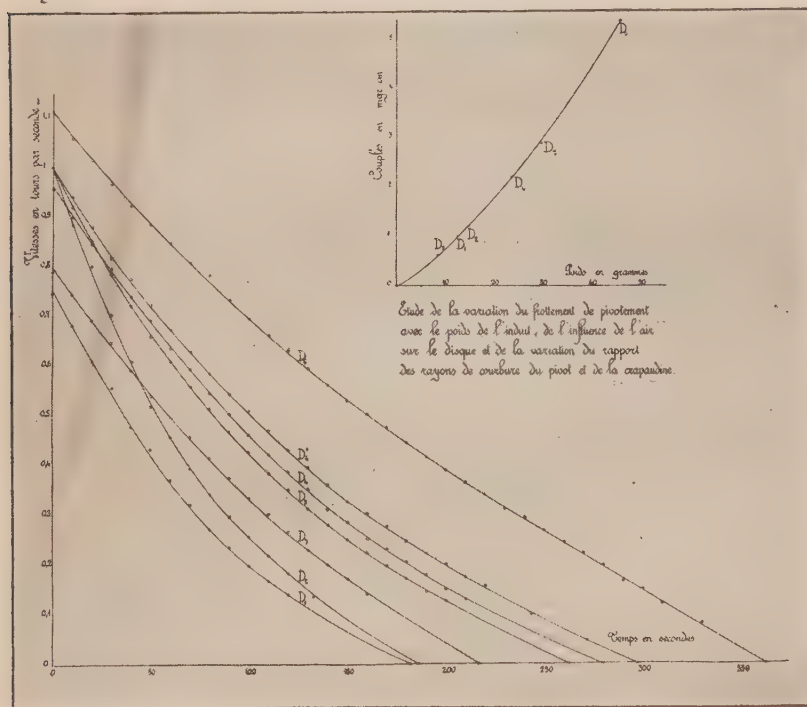


Fig. 2. — Courbes d'amortissement des disques des séries D.

expérience ( $P$  étant le poids en grammes de l'équipage mobile), on trouve un nombre constant; les théories de Léauté et de Hertz sur le frottement de pivotement se trouvent donc vérifiées expérimentalement puisque les longueurs des ellipses de contact sont proportionnelles à  $\sqrt[3]{P}$ .

Nous pouvons donc construire la courbe des couples de frottement en fonction des poids, ces couples variant comme la puissance 4/3 des poids (fig. 2).

Nous avons pu d'ailleurs vérifier la permanence de

métal pour le disque, les valeurs du couple sont proportionnelles aux épaisseurs c'est-à-dire, en définitive, aux poids de l'équipage puisque nous gardons toujours le même diamètre (1).

Ce résultat montre, d'une façon évidente, l'insuffisance de la notion de « couple spécifique » proposée par certains auteurs pour juger les compteurs d'électricité.

Le couple spécifique est, par définition, le rapport du couple moteur au poids de l'équipage; or, nous venons de voir que l'on a

$$\gamma = \frac{\text{Moment du couple moteur}}{\text{Poids de l'équipage mobile}} = \frac{KP}{P} = K.$$

Autrement dit, le « couple spécifique » d'un compteur d'induction ne varie pas quand on accroît son couple moteur en augmentant le poids de son équipage mobile, et quand on ne change pas, bien entendu, la nature du métal de l'induit.

Si maintenant nous donnons à  $\gamma$  la même signification que les Allemands, le terme devient

$$\gamma = \frac{KP}{P^{\frac{1}{3}}} = \frac{K}{P^{\frac{1}{3}}},$$

c'est-à-dire que le « facteur de qualité » varie en raison inverse de la racine cubique du poids de l'induit, le système des électroaimants étant supposé constant.

**2. Frottements dus au palier supérieur.** — Nous allons maintenant séparer des résultats précédents la valeur du couple dû au palier supérieur.

Nous avons eu soin de réaliser les disques  $D_2$  et  $D_6$ , dont les formes et les dimensions sont rigoureusement identiques, en des métaux de densités différentes, en l'espèce en aluminium et en cuivre.

Par emboutissage, on a donné aux disques une forme telle que le centre de gravité du système en rotation soit plus bas que le point de pivotement.

Des précautions spéciales ont été prises pour réaliser l'identité de forme : les disques ont été pris au milieu d'une feuille de métal laminé; chacun d'eux a été monté sur un plateau à collerette et dressé sur un tour de précision. On est arrivé ainsi à ce que les variations d'épaisseur du métal, en des points quelconques du disque, ne dépassent pas 0,002 mm, une fois l'emboutissage effectué. Enfin, les deux disques ont été montés par sertissage sur deux arbres réalisés avec le même souci d'égalité des formes.

Les deux disques, dont les poids sont de 14,870 g et 46,240 g, ont respectivement 1 mm d'épaisseur et 80 mm

(1) L'accroissement d'épaisseur du disque change évidemment la réaction d'induit; pour chaque mesure faite avec un disque différent, il est donc nécessaire de faire un nouveau réglage de la condition de proportionnalité, c'est-à-dire de rendre  $\varphi + \psi$  égal à  $\frac{\pi}{2}$ .

de diamètre. Les réactions dues à l'air sur les deux systèmes sont ainsi rigoureusement égales:

Nous pouvons écrire pour chacun d'eux les équations suivantes :

$$C_{t_2} = 0,00125 = 0,093 f L_2 \times 14,870 + C_p, \quad (1)$$

$$C_{t_6} = 0,0055 = 0,093 f L_6 \times 46,240 + C_p, \quad (2)$$

$L_2$  et  $L_6$  étant la longueur des ellipses de contact pour chacun des cas considérés et  $C_p$ , la somme des couples de frottement dus à l'air et au palier supérieur.

Comme nous avons employé pour les deux expériences le même palier supérieur et que les disques sont rigoureusement semblables au point de vue de la forme, nous pouvons admettre que les termes  $C_p$  sont égaux. D'autre part, au voisinage de  $\omega = 0$ , la résistance due à l'air est relativement négligeable si bien qu'en définitive le terme  $C_p$  représente le moment du couple dû aux frottements dans le palier supérieur seul.

Comme nous avons eu soin également d'opérer avec des paliers secs, autrement dit, sans interposition de lubrifiant, nous admettrons que les coefficients de frottement sont indépendants de la vitesse, de sorte que les deux équations (1) et (2) permettent de déduire  $f$  et  $C_p$  à la condition de connaître  $L_2$  et  $L_6$ . Or, les tables de Heerwagen calculées d'après les équations de Hertz fournissent, par une relation simple, les longueurs des demi-axes des ellipses de contact en fonction de la charge du pivot et des rayons de courbure du pivot et de la crapaudine : il suffit donc de mesurer ces rayons, les charges étant connues.

**a) MESURE DU RAYON DE COURBURE DU SAPHIR.** — Nous avons à cet effet réalisé un sphéromètre approprié permettant d'obtenir le rayon de courbure avec une approximation de  $\pm 0,01$  mm. Il serait, en effet, illusoire de compter sur une précision supérieure, puisque, en raison des opérations nécessitées par l'usinage, la creusure du saphir, théoriquement circulaire, est légèrement ovalisée, ainsi que le révèle l'examen au microscope.

**b) MESURE DU RAYON DE COURBURE DU PIVOT.** — C'est une opération des plus délicates. Pour l'effectuer, nous avons construit une lanterne de projection spéciale qui nous permet d'obtenir, sur un écran, une image du pivot grossie environ 350 ou 400 fois. On opère ensuite soit indirectement par photographie, soit directement en traçant au crayon sur l'écran de bristol le contour de l'image projetée. Un palmer de précision ou une mesure au micromètre permet de trouver, d'après la partie cylindrique du pivot, l'échelle de l'agrandissement, et une simple construction graphique fournit le rayon de courbure de la partie hémisphérique.

Connaissant les rayons de courbure  $r$  et  $R$  du pivot et de la crapaudine, soit respectivement, dans le cas considéré, 0,28 mm et 1,42 mm, on a le rapport

$$\frac{r}{R} = \frac{0,28}{1,42} = 0,197.$$

Les formules de Hertz simplifiées par M. Heerwagen donnent, pour les valeurs des demi-axes de l'ellipse,

$$a = A_p \sqrt[3]{\frac{2P}{H}} r,$$

$$b = B_p \sqrt[3]{\frac{2P}{H}} r$$

où  $P$  est la charge du pivot;  $r$ , son rayon de courbure;  $H$ , les  $3/2$  du module d'élasticité de l'acier et  $A_p$  et  $B_p$ , des coefficients qui, dans le cas de  $\frac{r}{R} = 0,197$ , sont respectivement égaux à 1,11 et 0,963 d'après les tableaux et les courbes de M. Heerwagen.

De ce qui précède, on tire pour  $L_2$ ,

$$a = 1,11 \sqrt[3]{\frac{2 \times 0,01487}{31\ 800}} \times 0,28 = 0,0007 \text{ cm},$$

$$b = 0,963 \sqrt[3]{\frac{2 \times 0,01487}{31\ 800}} \times 0,28 = 0,0006 \text{ cm}.$$

La formule de M. Boussinesq ou des tables spéciales nous donnent, pour  $L_2$ , la valeur 0,00416 cm.

Pour  $L_6$  on a de même

$$a = 1,11 \sqrt[3]{\frac{2 \times 0,04624}{31\ 800}} \times 0,28 = 0,00104 \text{ cm},$$

$$b = 0,963 \sqrt[3]{\frac{2 \times 0,04624}{31\ 800}} \times 0,28 = 0,00089 \text{ cm};$$

d'où  $L_6 = 0,0061 \text{ cm}$ .

Des deux équations on peut alors déduire

$$f = \frac{0,0055 - 0,00125}{0,093 (0,0061 \times 46,24 - 0,011 \times 14,87)} = 0,207;$$

d'autre part, on tire

$$C_p = 0,0055 - (0,093 \times 0,207 \times 0,0061 \times 46,24)$$

$$= 0,00007 \text{ cm-g},$$

valeur presque négligeable, comme on pouvait s'y attendre, en raison des précautions prises pour la réalisation des disques et des paliers supérieurs, ce qui fait qu'en définitive on obtient pour les couples de frottement dus au pivot inférieur seul les valeurs suivantes :

|                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| pour $D_1$ ..... | 0,0010 cm-g <sup>(1)</sup> |
| pour $D_2$ ..... | 0,0012 id                  |
| pour $D_3$ ..... | 0,0006 id                  |
| pour $D_4$ ..... | 0,0022 id                  |
| pour $D_6$ ..... | 0,0054 id                  |
| pour $D_7$ ..... | 0,0029 id                  |

(1) Valeurs légèrement supérieures à celles trouvées par l'expérience, en faisant fonctionner les disques des séries D en équilibre sur le pivot inférieur seul. En définitive, il semblerait que le coefficient de 0,085, proposé par Léauté, serait plus voisin de la vérité et fournirait des résultats plus conformes à ceux trouvés expérimentalement.

c) INFLUENCE DU POLISSAGE DES PIVOTS. — La valeur de  $f$  trouvée plus haut représente le coefficient de frottement de l'acier sur le saphir pour un état déterminé de cet acier, le saphir étant supposé avoir un polissage parfait<sup>(1)</sup>; or, le coefficient de frottement dépend du polissage du pivot lui-même. Nous conviendrons de définir la valeur d'un polissage par la mesure du grossissement microscopique au-dessus duquel on peut apercevoir les stries du métal ou de la pierre. Par exemple, nous dirons qu'un pivot a un polissage d'indice 50 quand aucune strie n'apparaît plus à l'examen microscopique en employant un grossissement 50, et que ses stries redeviennent visibles en employant le grossissement immédiatement supérieur<sup>(2)</sup>.

Nous avons déjà dit plus haut que les essais des disques  $D_1$ ,  $D_3$ , etc... ont été effectués en conservant le même pivot et la même crapaudine, ce pivot ayant un indice de polissage égal à 50. Si nous remplaçons ce pivot d'indice 50 par un pivot d'indice 25 et de rayon de courbure, mesuré comme précédemment, égal à 0,42 mm, nous obtenons avec le disque  $D_2$  muni d'un pivot d'indice de polissage 25 le tableau suivant et la courbe X de la figure 7<sup>(3)</sup>.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,952                             |
| 20                     | 0,885                             |
| 30                     | 0,813                             |
| 40                     | 0,724                             |
| 50                     | 0,664                             |
| 60                     | 0,596                             |
| 70                     | 0,555                             |
| 80                     | 0,489                             |
| 90                     | 0,425                             |
| 100                    | 0,40                              |
| 110                    | 0,340                             |
| 120                    | 0,294                             |
| 130                    | 0,266                             |
| 140                    | 0,225                             |
| 150                    | 0,198                             |
| 160                    | 0,162                             |
| 175                    | 0,116                             |
| 185                    | 0,083                             |
| 222                    | 0                                 |

Le palier supérieur restant toujours le même, on obtient en définitive, pour le moment du couple de pivotement, 0,00148 cm-g et on peut écrire l'équation :

$$0,00148 = 0,093 \times 14,87 \times L \times f'.$$

La longueur de l'ellipse de contact  $L$  étant trouvée égale à 0,0051 cm, on a en définitive

$$f'_{25} = \frac{0,00148}{0,093 \times 14,87 \times 0,0051} = 0,21 \text{ (4)}.$$

(1) Ce qui est vrai, comparativement à l'acier, et en adoptant notre définition de l'indice de polissage.

(2) Nous ne méconnaissons pas ce qu'a d'arbitraire une telle définition.

(3) Cette expérience a été faite simultanément avec la mesure du frottement dû au laminage de l'air.

(4) On pourrait ainsi déterminer la valeur des coefficients de frottement pour tous les indices de polissage.

L'amélioration du coefficient de frottement est donc très faible quand on passe du polissage 25 au polissage 50.

d) INFLUENCE DES RAYONS DE COURBURE DES PIVOTS ET DE LA CRAPAUDINE. — Il nous reste à vérifier comment se comporte le couple de frottement quand on fait varier le rayon de courbure de la crapaudine elle-même. Si nous répétons l'essai avec un pivot d'indite 25 et un disque D<sub>4</sub>, mais en employant un saphir dont le rayon de creusure est de 1,24 mm, le rayon de courbure du pivot étant 0,42 mm, nous obtenons le tableau suivant et la courbe D'<sub>4</sub> de la figure 2 : (l'expérience étant faite avec le disque se tenant en équilibre sans le secours du palier supérieur).

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,95                              |
| 20                     | 0,840                             |
| 30                     | 0,81                              |
| 40                     | 0,77                              |
| 50                     | 0,712                             |
| 60                     | 0,66                              |
| 70                     | 0,62                              |
| 80                     | 0,582                             |
| 90                     | 0,535                             |
| 100                    | 0,515                             |
| 110                    | 0,475                             |
| 120                    | 0,429                             |
| 130                    | 0,393                             |
| 140                    | 0,360                             |
| 150                    | 0,322                             |
| 160                    | 0,305                             |
| 170                    | 0,278                             |
| 180                    | 0,247                             |
| 190                    | 0,225                             |
| 200                    | 0,205                             |
| 210                    | 0,1755                            |
| 220                    | 0,16                              |
| 245                    | 0,099                             |
| 272                    | 0,051                             |
| 295                    | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,20}{95} = 0,0132 \text{ radian : s}^2$$

Couple de frottement,

$$C_f = \frac{182,5}{981} \times 0,0132 = 0,00246 \text{ cm-g,}$$

alors que ce couple n'était que de 0,0022 cm-g avec un rapport  $\frac{r}{R} = 0,197$ .

Or, le résultat fourni par la formule de Hertz est de

$$C_f = 0,093 \times 23,52 \times 0,0058 \times 0,21 = 0,0226 \text{ cm-g,}$$

la longueur  $L$  de l'ellipse de contact étant trouvée égale à 0,0058 cm.

On voit donc que les résultats fournis par l'expé-

rience et ceux donnés par l'application des formules sont absolument concordants en tenant compte de ce que le coefficient de Hertz nous conduit à des résultats différant d'environ 10 pour 100.

Pour diminuer le frottement de pivotement, il faut donc que le rapport entre les rayons de courbure du pivot et de la crapaudine soit aussi faible que possible ; il est évident qu'on sera vite arrêté dans cette voie par des raisons d'ordre mécanique. On ne peut diminuer indéfiniment le rayon de courbure du pivot sans risquer de voir la pointe de ce dernier s'émousser. D'autre part, on doit conserver au rayon de creusure du saphir une valeur assez petite pour que le pivot ait toujours tendance à se centrer par son propre poids sur la crapaudine. Si nous considérons la calotte sphérique déterminée par la creusure du saphir, on doit avoir, si  $\lg \alpha$  est la tangente de l'angle défini par le rapport entre la profondeur de la creusure et le rayon du cercle de base de la calotte sphérique,

$$\lg \alpha > \lg \varphi.$$

$\lg \varphi$  étant, par définition, le coefficient de frottement, soit 0,207 dans le cas d'un polissage 50.

Quant aux frottements du palier supérieur, ils seraient théoriquement nuls si le disque n'avait rigoureusement aucun balourd et si, d'autre part, l'action exercée normalement au disque par les électroaimants était nulle. Or, nous avons pu nous rendre compte que tous les disques de compteurs présentaient un balourd appréciable et que, quelles que fussent les précautions prises, il était pratiquement impossible d'arriver pour les frottements du palier supérieur (sans interposition de lubrifiant) à réduire la valeur du moment du couple de frottement à moins de 0,00005 cm-g<sup>(1)</sup>. Cette valeur augmente considérablement pour les induits fixés sur l'arbre par un moyeu en alliage<sup>(2)</sup>.

Ce procédé de fixation de l'arbre sur le disque au moyen d'un alliage très fusible, qui s'est beaucoup développé dans ces dernières années, parce que très économique, a le grave inconvénient d'augmenter la valeur du balourd. On peut corriger ce balourd en ajoutant au disque de petites masses additionnelles disposées en des points convenables. A cet effet, on perce le disque en aluminium de petits trous de 1 mm à 1,5 mm de diamètre, et on remplace la matière enlevée par un alliage plus dense. Dans certaines maisons, on se borne à tourner après coup le moyeu fondu ; mais, en fait, la plupart des constructeurs négligent totalement cette opération et emploient leurs induits tels qu'ils sortent de la machine à fondre. Nous avons pu observer ainsi la différence caractéristique qui existe au point de vue du frottement des paliers supérieurs, entre les axes fixés à l'aide d'un moyeu fondu et ceux où l'on emploie le procédé de fixation par ser-

(1) Ce nombre obtenu par différence dans l'essai d'un disque fonctionnant en équilibre sans palier supérieur, ne constitue évidemment qu'un ordre de grandeur.

(2) On emploie généralement un alliage de plomb, d'étain et d'antimoine.



Tableau et courbes  $M'$  et  $M'''$ , cette dernière ne figurant pas sur le cliché 3.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,91                              |
| 20                     | 0,833                             |
| 30                     | 0,77                              |
| 40                     | 0,69                              |
| 50                     | 0,625                             |
| 60                     | 0,578                             |
| 70                     | 0,526                             |
| 80                     | 0,476                             |
| 90                     | 0,438                             |
| 100                    | 0,40                              |
| 110                    | 0,357                             |
| 120                    | 0,328                             |
| 130                    | 0,284                             |
| 140                    | 0,256                             |
| 148                    | 0,232                             |
| 168                    | 0,182                             |
| 180                    | 0,152                             |
| 195                    | 0,111                             |
| 205                    | 0,094                             |
| 218                    | 0,069                             |
| 243                    | 0                                 |

Ces tableaux montrent donc surabondamment que la lubrification de la crapaudine n'a aucune action utile.

Bien que semblant paradoxal à première vue, ce résultat était à prévoir.

S'il est vrai que le coefficient de frottement des surfaces huilées est plus petit que celui des mêmes surfaces sèches, il faut, pour que le frottement soit diminué, que la lubrification soit possible. Or, si nous nous reportons aux dimensions des ellipses de contact d'un disque léger comme  $D_1$ , par exemple, la surface de contact est égale à

$$S = \pi ab = \pi \times 0,0068 \times 0,0058 = 0,000124 \text{ mm}^2.$$

La pression moyenne entre le pivot et la crapaudine est égale à

$$k = \frac{P}{\pi ab} = \frac{0,012}{0,000124} = 97 \text{ kg : mm}^2.$$

Ainsi la pression exercée par l'induit sur la crapaudine du compteur est de l'ordre de  $10 \text{ t : cm}^2$ . Tous les compteurs à induction que nous avons examinés dans cette étude présentent d'ailleurs des pressions variant entre  $80$  et  $120 \text{ kg : mm}^2$ ; dans les compteurs à courant continu, on atteint même parfois  $300 \text{ kg : mm}^2$ . Or, à cette pression, l'huile n'a plus aucune action utile puisqu'elle ne peut subsister entre les surfaces en contact d'où elle est immédiatement expulsée; autrement dit, dans le cas qui nous occupe, on ne peut jamais

avoir frottement médiat, mais on a toujours un frottement immédiat <sup>(1)</sup>.

D'autre part, non seulement l'huile est inutile, mais elle est nuisible. Fraîche, elle est la collectrice de toutes les poussières qui flottent autour du pivot, et ces poussières une fois fixées constituent sur le fond de la crapaudine un véritable enduit qui s'oppose au mouvement. Quand l'huile se dessèche, il se produit une sorte de résinification et la crapaudine se tapisse d'une pellicule solide facilement décelable au microscope et même détachable avec une fine pointe d'acier. Cette pellicule est entraînée par le pivot et augmente naturellement le couple de frottement. Nous avons mis son action en évidence dans l'essai du compteur A. Ce compteur, muni d'une crapaudine huilée, a d'abord été essayé sortant de fabrication (courbe A, figure 10). Puis, nous avons provoqué artificiellement le dessèchement de la crapaudine et nous avons répété l'expérience. Les résultats de ces essais, consignés dans les tableaux A et A' reproduits dans l'essai du compteur A, montrent que le couple de frottement dû au pivot est augmenté de 30 pour 100.

Indépendamment de cette action purement mécanique, l'huile peut agir chimiquement en attaquant les parties métalliques. Cette action est rapide quand les huiles sont légèrement acides, si bien qu'au bout de deux à trois ans, les frottements des organes lubrifiés se trouvent augmentés dans des proportions considérables.

Toutes ces considérations, bien qu'élémentaires, ont échappé encore jusqu'à présent à la plupart des constructeurs qui continuent à mettre de l'huile dans le palier inférieur. Certains prétendent qu'ainsi ils améliorent le démarrage, or cet argument est également inexact. Quand bien même la pression n'interviendrait pas pour expulser l'huile, celle-ci n'aurait absolument aucune action au démarrage, car, ainsi que l'a montré Hirn <sup>(2)</sup> et que l'a confirmé ensuite Marcel Desprez dans ses expériences de Creil, le frottement médiat est égal au frottement immédiat quand la vitesse est voisine de 0.

La courbe  $M'$ , figure 3, obtenue avec un disque quelconque de la série  $D_1$ , montre qu'il n'en est pas de même en ce qui concerne l'action de l'huile dans le palier supérieur. Ici, les pressions sont à peu près nulles et, si on a eu soin de prévoir une réserve d'huile suffisamment importante et un dispositif approprié pour en réduire l'évaporation au minimum, l'action du lubrifiant peut améliorer sensiblement le fonctionnement.

De la courbe  $M'$ , on déduit à l'origine un couple de frottement

$$C_f = 0,00108 \text{ cm-g.}$$

<sup>(1)</sup> Signalons, en passant, que les très grandes pressions exercées sur les crapaudines ne sont nullement dangereuses pour celles-ci puisque, pour des pressions de  $100 \text{ kg : mm}^2$ , le coefficient de sécurité dépasse encore 10 pour le saphir. En ce qui concerne l'acier, c'est plutôt son indice de dureté qui intervient et, ici encore, ces nombres restent dans les limites admissibles pour éviter une usure prématurée des pivots en acier trempé.

<sup>(2)</sup> *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1884, t. XCIX, p. 253.

Comme avec le palier supérieur sec, on obtenait d'après la courbe M, un couple de frottement égal à 0,00169 cm-g, le gain est donc de l'ordre de 0,0006 cm-g.

On peut remarquer que le couple donné par la courbe M' est égal, aux erreurs d'expérience près, à celui fourni par un disque D<sub>1</sub> parfaitement équilibré et dont le palier supérieur est sec.

L'huile a donc pour effet de remédier, en diminuant les frottements développés dans le palier supérieur, aux inconvénients résultant d'un léger défaut d'équilibre du disque.

Cependant, il faut noter qu'il ne suffirait pas de huiler un palier mal conditionné pour rendre négligeables ses frottements; le tableau suivant, résultat d'un essai d'un disque de la série D<sub>2</sub> dans lequel on a provoqué volontairement un léger défaut dans le palier supérieur, en est la preuve.

Tableau.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 10                     | 1,35                              |
| 10                     | 1,25                              |
| 20                     | 1,135                             |
| 30                     | 0,92                              |
| 40                     | 0,85                              |
| 50                     | 0,784                             |
| 60                     | 0,752                             |
| 70                     | 0,654                             |
| 80                     | 0,572                             |
| 90                     | 0,50                              |
| 100                    | 0,435                             |
| 110                    | 0,37                              |
| 120                    | 0,322                             |
| 130                    | 0,27                              |
| 140                    | 0,208                             |
| 150                    | 0,175                             |
| 160                    | 0,128                             |
| 170                    | 0,092                             |
| 198                    | 0                                 |

L'accroissement du couple de frottement à l'origine est de

$$0,0025 - 0,00125 = 0,00125 \text{ cm-g,}$$

soit autant que pour le couple dû au frottement du pivot inférieur seul. Ainsi donc, dans ce cas, le mauvais état du palier supérieur, joint au déséquilibre de l'induit, suffit à doubler la valeur du couple de frottement.

f) CONCLUSIONS. — En résumé, on améliorera le frottement de pivotement d'abord, en allégeant l'équipage mobile et en réduisant, autant que les possibilités mécaniques le permettront, le rapport entre les rayons de courbure du pivot et de la crapaudine et en conditionnant convenablement le palier supérieur: dans cet ordre d'idées, les paliers supérieurs à aiguille-guide nous semblent donner les meilleurs résultats. Le minimum au-dessous duquel il ne faudra pas descendre

pour le rayon de courbure du pivot sera donné par le travail (pression spécifique) auquel sera soumis le pivot lui-même. Si l'on admet, pour un pivot trempé sec, une dureté de 600 kg: mm<sup>2</sup>, il sera bon de ne pas dépasser une pression de 100 à 120 kg: mm<sup>2</sup>. Au delà, étant donné surtout que nous travaillons sans interposition de lubrifiant, il y aurait usure rapide des organes en contact et, par voie de conséquence, augmentation du couple de frottement. C'est donc commettre une hérésie que d'employer indifféremment le même pivot pour les compteurs à induction, à équipages légers, et pour les compteurs wattheuremètres à courant continu, considérablement plus lourds.

D'autre part, il sera primordial de réaliser des équipages dont le balourd sera réduit au minimum; il existe d'ailleurs des appareils à déceler les balourds et nous les avons vus fonctionner dans une usine étrangère que nous avons eu l'occasion de visiter, la correction du balourd s'effectuant simplement par adjonction, dans la matière du disque et en des points déterminés, de petites masses additionnelles constituées par un métal de densité différente.

Enfin, la question du polissage des pivots est aussi de la plus haute importance. Il est nécessaire que le profil de ces pivots soit d'abord absolument correct (corps de révolution) ou que ceux-ci ne présentent aucune dyssymétrie appréciable. Il semble que l'indice de polissage 25 soit un minimum au-dessous duquel il ne faut pas descendre pour obtenir des démarrages francs sous charge très réduite. Au point de vue industriel, la vérification du polissage est du reste très facile et peu coûteuse: dans tous les cas, nous estimons qu'aucun constructeur sérieux ne peut s'en dispenser. Les photographies ci-contre montrent la différence entre un pivot poli et un pivot brut mal conformé (fig. 4 et 5).

Quant aux pierres fines de crapaudines (saphirs ou rubis), les mêmes précautions devront être prises pour s'assurer de leur parfaite qualité. Nous avons remarqué que la plupart des constructeurs se bornaient à vérifier l'état des pierres des crapaudines en en faisant l'essai avec une pointe fine afin de déceler, s'il y a lieu, les fêlures qui ont pu se produire lors du sertissage ou dans tout autre phase de la fabrication. Ce mode de vérification est absolument insuffisant. L'examen au microscope des crapaudines d'un certain nombre de compteurs de constructions différentes nous a révélé que, dans près de la moitié des appareils contrôlés, la creusure du saphir était tapissée par une sorte de pellicule formée de débris d'abrasif et de limailles de laitton résidus du sertissage, le tout fixé le plus souvent par l'huile imprudemment ajoutée par le constructeur. Cette pellicule forme ainsi un frein excellent et ne contribue pas peu à fournir un mauvais démarrage. Il est évident que le pivot le mieux poli tournant dans une telle crapaudine ne peut donner que de mauvais résultats. Il est d'ailleurs plus facile d'obtenir un polissage parfait de la crapaudine que du pivot lui-même, la creusure sphérique se prêtant aisément au polissage automatique.

3. **Frottements dus à l'air.** — Nous avons vu plus haut que, dès que la vitesse du disque atteint 0,1 tour par seconde, le couple de frottement cesse d'être constant et augmente rapidement de valeur en raison de la résistance opposée par l'air.

Tenue pour négligeable par certains praticiens, cette influence de l'air est cependant prépondérante dans beaucoup d'appareils (1). Elle augmente d'importance, comme on pouvait s'y attendre, avec le rayon du disque. La forme du disque intervient également ; quand ce dernier comporte des stries ou des impressions destinées à renforcer sa rigidité, l'entraînement de l'air est alors beaucoup plus important que dans le cas d'un

*Variation du couple dû à la résistance de l'air en fonction de la vitesse.*

| Vitesse<br>t : s | $\frac{d\omega}{dt}$ | $C_f$ total<br>en cm-mg | Couple<br>dû à l'air<br>en cm-mg |
|------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 0                | 0,0121               | 1,25                    | 0                                |
| 0,1              | 0,013                | 1,34                    | 0,09                             |
| 0,2              | 0,0166               | 1,71                    | 0,46                             |
| 0,3              | 0,0194               | 2,00                    | 0,75                             |
| 0,4              | 0,0245               | 2,52                    | 1,27                             |
| 0,5              | 0,028                | 2,89                    | 1,64                             |
| 0,6              | 0,033                | 3,40                    | 2,15                             |
| 0,7              | 0,0375               | 3,86                    | 2,61                             |
| 0,8              | 0,042                | 4,33                    | 3,08                             |
| 0,9              | 0,046                | 4,64                    | 3,39                             |
| 1,0              | 0,05                 | 5,15                    | 3,90                             |



Fig. 4. — Pivot de forme correcte.

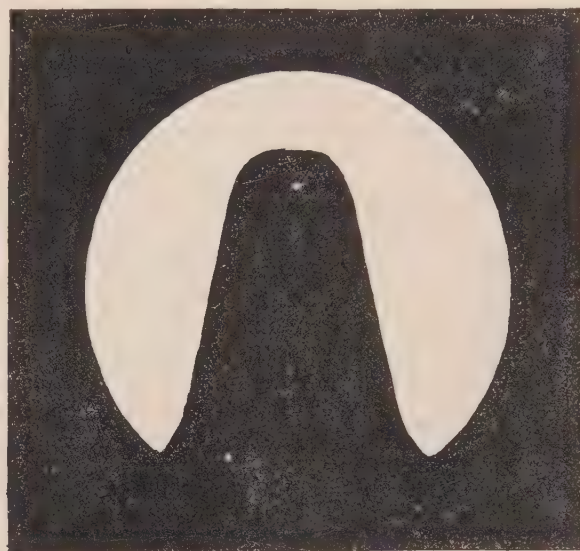


Fig. 5. — Pivot mal formé et strié.

disque lisse, et à plus forte raison encore quand, au lieu d'être plan, il comporte de véritables ondulations. Nous verrons d'ailleurs plus loin un exemple typique d'essai de compteur muni d'un disque ondulé.

Le couple freinant dû à l'air est également augmenté quand le disque présente des trous ou des fentes destinés à annuler la marche à vide. Il est préférable, si l'on est obligé de conserver ce dispositif, de diminuer l'action de ces trous en les allongeant dans une direction perpendiculaire à un rayon. Le tableau suivant, obtenu au moyen d'un disque de la série D<sub>2</sub> de 1 mm d'épaisseur et de 80 mm de diamètre, montre la loi de variation du couple dû à la résistance de l'air en fonction de la vitesse, le couple freinant étant obtenu en retranchant du couple total (pivots + air) à une vitesse déterminée, la valeur du couple représentant la somme des frottements dus aux pivots pour  $\omega$  voisin de zéro.

(1) Ajoutons même que l'on a utilisé la résistance de l'air pour créer le couple amortisseur d'un ampèreheuremètre à induction.

La courbe déduite de ce tableau montre que le couple freinant dû à l'air n'a pas une allure parabolique. Etant donné que les vitesses développées dans les compteurs sont, somme toute, relativement faibles, le terme dû à la vitesse n'intervient qu'à la première puissance. Dans les compteurs à très grande vitesse (de l'ordre de 10 t : s, le terme du 2<sup>e</sup> degré apparaît, au contraire, très nettement.

Les résultats sont également influencés par les réactions des parois des compteurs ainsi que par l'action de laminage créée lors du passage du disque dans les entrefers des électroaimants. Il serait évidemment possible de déterminer la valeur de cette action, mais cette séparation n'offre aucun intérêt pratique.

a) INFLUENCE DE LA FORME DE L'AIMANT AU POINT DE VUE DU COUPLE DE FROTTEMENT. — Le disque, en tournant, entraîne dans son mouvement les couches d'air voisines de sa surface et, au moment du passage de ces couches dans l'entrefer de l'aimant amortisseur, il se produit un véritable laminage qui tend à s'opposer à la rotation. La valeur de ce laminage n'avait pas encore, jusqu'ici,

été mise en évidence. Afin de n'être pas gêné par l'action des courants de Foucault, nous avons fait établir des maquettes en bois des différentes formes d'aimants utilisées dans l'industrie et nous avons mesuré, toujours par la méthode d'amortissement, la différence des couples de frottement développés avec ou sans aimant (<sup>1</sup>).

Les formes d'aimants actuellement utilisées se ramènent à deux types principaux que nous désignons par les lettres Y et Z (fig. 6). Dans le premier, l'étranglement que l'air, entraîné par le disque, est obligé de traverser,

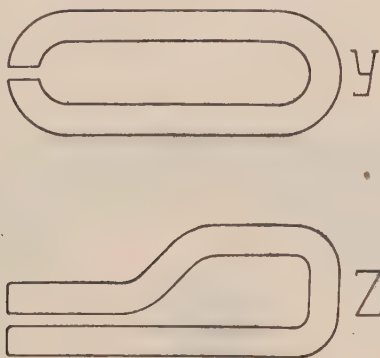


Fig. 6. — Types d'aimants amortisseurs.

ser, est beaucoup plus court que dans celui de la forme Z. Il existe tout une série de formes intermédiaires présentant des étranglements plus ou moins longs.

Les résultats d'essais des types Y et Z sont consignés dans les 3 tableaux suivants et dans les courbes de la figure 7.

*Essai n° 1. — Sans aimant.*

*Tableau et courbe X, figure 7.*

| Temps.<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 0                       | 1,00                              |
| 10                      | 0,952                             |
| 20                      | 0,885                             |
| 30                      | 0,813                             |
| 40                      | 0,724                             |
| 50                      | 0,664                             |
| 60                      | 0,596                             |
| 70                      | 0,555                             |
| 80                      | 0,489                             |
| 90                      | 0,425                             |
| 100                     | 0,40                              |
| 110                     | 0,340                             |
| 120                     | 0,294                             |
| 130                     | 0,266                             |
| 140                     | 0,225                             |
| 150                     | 0,198                             |
| 160                     | 0,162                             |
| 175                     | 0,116                             |
| 185                     | 0,083                             |
| 222                     | 0                                 |

(<sup>1</sup>) Il est évident que, par aimant, nous entendons ici la maquette en bois du dit aimant, tout se passant, au point de vue mécanique, comme s'il s'agissait de l'aimant véritable.

*Essai n° 2. — Maquette d'aimant forme Y.*

*Tableau et courbe Y, figure 7.*

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,730                             |
| 10                     | 0,65                              |
| 20                     | 0,58                              |
| 30                     | 0,527                             |
| 40                     | 0,475                             |
| 50                     | 0,415                             |
| 60                     | 0,357                             |
| 70                     | 0,307                             |
| 80                     | 0,263                             |
| 90                     | 0,218                             |
| 102                    | 0,182                             |
| 107                    | 0,161                             |
| 122                    | 0,112                             |
| 134                    | 0,0735                            |
| 163                    | 0                                 |

*Essai n° 3. — Maquette d'aimant forme Z.*

*Tableau et courbe Z, figure 7.*

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,894                             |
| 20                     | 0,74                              |
| 30                     | 0,666                             |
| 40                     | 0,572                             |

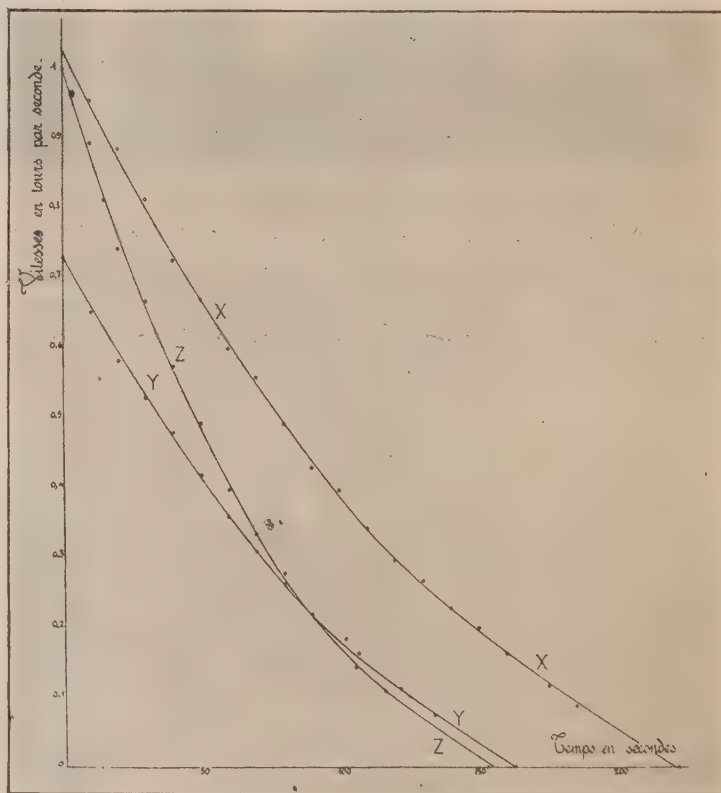


Fig. 7. — Influence de la forme de l'aimant au point de vue du couple de frottement dû à l'air.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par secondes) |
|------------------------|------------------------------------|
| 50                     | 0,49                               |
| 60                     | 0,397                              |
| 70                     | 0,333                              |
| 80                     | 0,278                              |
| 90                     | 0,218                              |
| 108                    | 0,141                              |
| 116                    | 0,109                              |
| 153                    | 0                                  |

Nous avons opéré avec un disque de la série D<sub>2</sub> (muni d'un pivot de polissage 25) qui nous a servi de terme de comparaison.

Le disque D<sub>2</sub> a 1 mm d'épaisseur et les deux maquettes d'aimant ont été choisies de même largeur (27 mm) et présentent la même longueur d'entrefer (2,4 mm).

Ces tableaux et les courbes Y et Z nous permettent de constater qu'au voisinage du démarrage la forme de l'aimant est indifférente : les coefficients angulaires des 3 courbes X, Y, Z, ont la même valeur à l'origine (fig. 7). Puis, au fur et à mesure que la vitesse augmente, l'influence du laminage se fait sentir : peu importante avec des aimants de la forme Y, elle devient vite prépondérante pour les aimants de la forme Z. Pour ceux-ci on a :

Pour  $v = 0,5 \text{ t : s}$ , un couple résistant de 0,00187 cm-g ;

Pour  $v = 0,7 \text{ t : s}$ , un couple résistant de 0,0023 cm-g ;

Pour  $v = 0,834 \text{ t : s}$ , un couple résistant de 0,0027 cm-g ;  
c'est-à-dire plus de deux fois la valeur du couple dû aux pivots.

Pour cette dernière vitesse, le couple freinant dû au laminage de l'air dans l'aimant de la forme Y n'est que de 0,0013 cm-g.

Ces résultats montrent l'importance de la forme des aimants en ce qui concerne la résistance due au laminage de l'air : les aimants de la forme Z sont donc absolument défavorables à ce point de vue et à déconseiller.

En résumé, il sera intéressant, pour réduire les frottements dus à l'air, de n'employer que des aimants de forme appropriée et des vitesses de régime aussi faibles que possible. Cette dernière condition est nécessaire, par ailleurs, pour l'obtention d'une courbe d'erreurs très tendue et elle facilitera également, comme nous le verrons plus loin, la diminution du couple résistant du mécanisme enregistreur. Signalons que la diminution du diamètre du disque entraînerait la diminution du couple moteur ; comme la résistance de l'air n'intervient pas au démarrage et qu'à pleine charge elle reste négligeable vis-à-vis du couple moteur, cette dernière solution est évidemment à rejeter.

**4. Frottements dus aux engrenages de la minuterie et réaction de la roue tangente sur la vis sans fin.** — Les compteurs d'électricité sont munis d'un

dispositif d'enregistrement (auquel on donne, assez improprement, d'ailleurs, le nom de minuterie). Ces minuteries sont de trois types principaux :

Les systèmes dits à aiguilles, où les consommations sont indiquées par des aiguilles se déplaçant sur des cadrans décimaux, le dispositif à rouleaux (rouleaux Deschiens qui sont en fait des engrenages intermittents du type fuscau-lanterne), et les minuteries à chiffres sauteurs.

Pendant longtemps, on a admis que les dispositifs à aiguilles, qui sont constitués pas des trains d'engrenages à rapport de réduction décimal, étaient seuls susceptibles de fournir un couple de frottement réduit. A la vérité, nous avons pu nous rendre compte que, si les minuteries à aiguilles, bien construites, étaient celles qui donnaient le plus petit couple de frottement, certaines minuteries à rouleaux donnaient des résultats avantageusement comparables à ceux fournis par des minuteries à aiguilles de construction moyenne.

Quant aux minuteries à chiffres sauteurs, où l'escamotage d'un chiffre est produit par l'action d'un contre-poids ou d'un petit ressort spiral, elles ont l'inconvénient de donner des couples résistants variables avec la position du voyant, ce qui ne laisse pas d'être un grave inconvénient quand le compteur fonctionne à charge très réduite.

La mesure des frottements dus aux minuteries est à peu près la seule à laquelle les constructeurs se soient intéressés jusqu'à présent. C'est, d'ailleurs, la plus facile : si nous essayons un compteur par la méthode d'amortissement, en ayant soin de retirer sa minuterie, le même essai répété ensuite avec la minuterie engrenée permet de déterminer, par différence, les pertes dues aux frottements des rouages et de la roue tangente de commande, puisqu'on peut admettre que le moment d'inertie de la minuterie est absolument négligeable, eu égard à celui du disque.

M. O'Keenan avait déjà, pour la détermination des frottements des minuteries, proposé d'utiliser un compteur O'K fonctionnant comme moteur étaloné.

Si l'on mesure, à l'aide d'un milliampèremètre, le courant dans l'induit du compteur O'K et la tension aux bornes des balais, le couple développé par le système est donné par la formule

$$C = 10^7 \frac{U_c i}{2 \pi n} \times \frac{1}{981} = 1624 U_c \times \frac{i}{n},$$

où  $U_c$  est la différence de potentiel aux bornes des balais, exprimée en volts, et  $n$ , le nombre de tours par seconde de l'induit,  $i$  étant le courant, en ampères, traversant cet induit.

Si on détermine, une fois pour toutes, le rapport

$$\frac{U_c}{n} = K,$$

la formule se résume à

$$C = 1624 K i$$

pour le moteur fonctionnant à vide.

Si maintenant nous embrayons sur la vis sans fin du compteur la minuterie à essayer, nous obtenons une nouvelle valeur  $C'$ , telle que

$$C' = 1\,624\,Kv'$$

d'où, par différence,  $C_t = C' - C$ .

Comme nous avons pu nous rendre compte, par les nombres qui nous ont été communiqués par M. O'Keenan, que la méthode d'amortissement donnait des résultats comparables (aux erreurs de l'expérience près) à la méthode du moteur étalonné, nous avons, dans les essais de la présente étude, continué à nous servir de la méthode d'amortissement.

Nous avons déterminé, en premier lieu, quelle était l'influence du sens de la réaction de la roue tangente sur la vis sans fin qui la commande.

Selon le sens de rotation, ou encore selon le sens du pas de la vis sans fin, la réaction de la roue tangente tend à augmenter l'action de la pesanteur (c'est-à-dire tend à augmenter la pression du pivot sur la crapaudine), ou, au contraire, elle tend à diminuer cette pression.

Le calcul et l'expérience montrent que la valeur de cette réaction est de l'ordre de la limite des couples décelables par notre méthode, soit de 0,05 cm-mg. Bien que l'existence de cette réaction des roues tangentes soit connue, son importance a été tenue pour négligeable par certains constructeurs dont les appareils présentent ainsi un petit couple de frottement supplémentaire dont ils pourraient se débarrasser gratuitement.

Au lieu de changer le sens de la vis, on peut faire cette vérification d'une façon plus simple en faisant tourner le compteur à l'envers et en relevant les résultats dans les deux cas. Toutefois, pour que cet essai ait une signification, il faut que les dents de la roue tangente aient des profils bien symétriques. Il peut arriver en effet que, lorsque le profil de la denture a été rectifié au moyen d'une fraise à arrondir, les deux flancs de la dent ne soient pas également attaqués par l'outil, d'où une dyssymétrie du profil et, naturellement, des efforts résistants selon le sens de la rotation.

Le mode de fabrication des vis sans fin a également une importance. Certains constructeurs obtiennent ces vis en les décolletant à même dans le métal de l'arbre, ce qui présente l'inconvénient de conduire soit à un arbre trop lourd soit à une vis trop faible. Il peut en résulter alors, dans ce dernier cas, un fléchissement de l'arbre qui contribue à augmenter les frottements dans le palier supérieur.

Afin d'éviter le premier inconvénient, certains constructeurs ont réalisé des vis sans fin prises dans le métal d'un arbre en alliage léger (du duralumin, en général). Ces vis sans fin ne sont pas non plus à conseiller au point de vue frottements, parce que non seulement l'aluminium est un métal « gras », mais encore parce qu'il se forme à sa surface une couche d'oxyde qui vient altérer considérablement la valeur du coefficient de frottement.

Un autre mode de construction, à notre avis, de beaucoup préférable au précédent, consiste à rapporter la vis sans fin sur l'arbre par emmanchement dur.

Dans ce cas, la vis est en laiton ou en nickel et les pertes par frottement dépendent de la nature et de l'état des métaux en contact.

En ce qui concerne les minuteriers, les essais effectués montrent que les résistances de frottement dépendent de la plus ou moins grande perfection des pivotages, et surtout du nombre des mobiles actionnés, le couple résistant s'accroissant naturellement avec ces derniers. La diminution de la vitesse de régime du compteur favorisera donc l'établissement de minuteriers à faibles pertes, du fait de la possibilité de supprimer des trains d'engrenages intermédiaires.

ACTION DE L'HUILE SUR LES PIVOTS. — Il nous reste maintenant à examiner l'action de l'huile sur les pivots des minuteriers.

Nous avons employé pour cette vérification une minuterie d'un type un peu différent de celui des expériences précédentes ainsi qu'un disque relativement lourd, ceci afin d'augmenter la précision des mesures (disque de la série  $D_4$ ).

*Essai n° 1. — Disque  $D_4$  plus minuterie non huilée.*

Tableau et courbe O, figure 3.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,75                              |
| 10                     | 0,666                             |
| 20                     | 0,625                             |
| 30                     | 0,565                             |
| 40                     | 0,526                             |
| 50                     | 0,475                             |
| 60                     | 0,425                             |
| 70                     | 0,380                             |
| 80                     | 0,333                             |
| 90                     | 0,285                             |
| 102                    | 0,233                             |
| 111                    | 0,196                             |
| 132                    | 0,096                             |
| 154                    | 0                                 |

*Essai n° 2. — Disque  $D_4$  plus minuterie huilée.*

Tableau et courbe O', figure 3.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,78                              |
| 10                     | 0,715                             |
| 20                     | 0,66                              |
| 30                     | 0,614                             |
| 40                     | 0,536                             |
| 50                     | 0,50                              |
| 60                     | 0,435                             |
| 70                     | 0,382                             |
| 80                     | 0,333                             |
| 90                     | 0,278                             |
| 102                    | 0,222                             |
| 113                    | 0,162                             |
| 129                    | 0,099                             |
| 157                    | 0                                 |

On voit par les courbes O et O' de la figure 3 que l'action favorable due au lubrifiant est insignifiante. — Ce résultat était également à prévoir en raison de la faible vitesse des rouages : il n'y a donc aucun avantage à huiler copieusement les pivots comme le font la plupart des constructeurs ; il suffirait de les humecter légèrement pour les préserver de la rouille, tout au moins quand on a affaire à des axes en acier. Depuis un certain nombre d'années, on construit également des minuteriers dont les axes des roues sont en laiton ; ces minuteriers sont particulièrement sensibles à l'action chimique de l'huile.

Les inconvénients dus au dessèchement du lubrifiant, signalés déjà à propos des crapaudines, vont se retrouver, et considérablement augmentés, dans les minuteriers. Nous avons remarqué qu'on pouvait amener les minuteriers à un état sensiblement voisin de ce qu'elles seraient après deux années environ de fonctionnement dans un compteur parfaitement étanche en les soumettant, pendant vingt-quatre heures, à la température d'une étuve maintenue à 110° ou 120°C. Les couples de frottement ainsi mesurés après résinification artificielle de l'huile sont évidemment des minima puisque, en réalité, on ne tient pas compte de l'introduction des poussières, limailles, etc., ni des altérations produites par l'action chimique de l'huile.

Nous avons principalement examiné deux types de minuteriers à aiguilles : dans le premier type la roue tangente est montée sur un axe pivoté en acier supporté par deux contre-pivots à creusure conique. Dans le second modèle, l'arbre de la roue tangente tourne simplement dans des trous ménagés dans les platines en laiton, ces trous étant fraisés de façon à former huilliers. Les résultats de ces essais sont consignés ci-dessous.

*Essai n° 3. — Minuterie desséchée (plus disque de comparaison).*

Tableau et courbe S', figure 8.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,04                              |
| 10                     | 0,90                              |
| 20                     | 0,76                              |
| 30                     | 0,646                             |
| 40                     | 0,55                              |
| 50                     | 0,42                              |
| 60                     | 0,357                             |
| 72                     | 0,227                             |
| 84                     | 0,122                             |
| 101                    | 0                                 |

Moment d'inertie,

$$K = 240 \text{ g-cm}^2.$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,368}{51} = 0,0453 \text{ radians : s}^2.$$

Couple du disque et de la minuterie,

$$C_t = \frac{0,0453 \times 240}{981} = 0,0111 \text{ cm-g.}$$

*Essai n° 4. — Disque de comparaison seul.*

Tableau et courbe S, figure 8.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,605                             |
| 10                     | 0,512                             |
| 20                     | 0,455                             |
| 30                     | 0,370                             |
| 40                     | 0,318                             |
| 51                     | 0,235                             |
| 67                     | 0,145                             |
| 76                     | 0,10                              |
| 99                     | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,260}{61,5} = 0,0249 \text{ radians : s}^2$$

Couple dû au disque seul,

$$C_t = \frac{240}{981} \times 0,0249 = 0,0061 \text{ cm-g.}$$

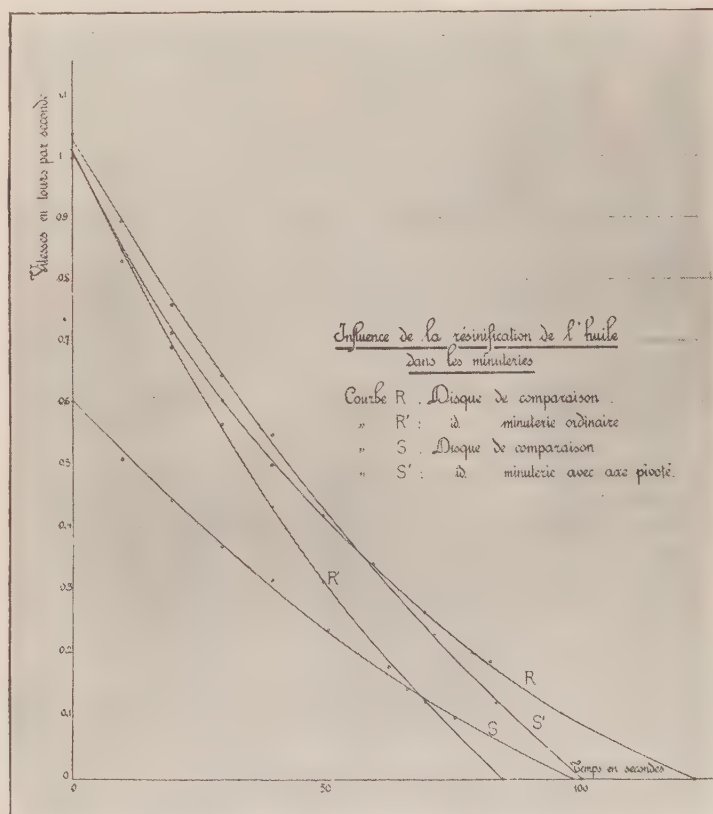


Fig. 8. — Influence de la résinification dans les minuteriers.

Couple dû à la minuterie

$$0,0111 - 0,0061 = 0,005 \text{ cm-g.}$$

La minuterie neuve et fraîchement huilée ayant un couple de 0,0039 cm-g, l'accroissement dû à la résinification de l'huile est de l'ordre de 30 pour 100.

*Essai n° 5.* — Courbe à vide (disque de comparaison seul).

Tableau et courbe R, figure 8.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,85                              |
| 20                     | 0,714                             |
| 30                     | 0,605                             |
| 40                     | 0,50                              |
| 50                     | 0,42                              |
| 60                     | 0,342                             |
| 70                     | 0,265                             |
| 83                     | 0,185                             |
| 97                     | 0,104                             |
| 123                    | 0                                 |

Moment d'inertie du disque,

$$K = 163,5 \text{ g-cm}^2.$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,216}{60} = 0,0226 \text{ radians : s}^2.$$

Couple dû au disque seul

$$C_t = \frac{163,5 \times 0,0226}{981} = 0,00377 \text{ cm-g.}$$

*Essai n° 6.* — Disque de comparaison plus minuter desséchée.

Tableau et courbe R', figure 8.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,83                              |
| 20                     | 0,69                              |
| 30                     | 0,57                              |
| 40                     | 0,435                             |
| 50                     | 0,313                             |
| 63                     | 0,175                             |
| 70                     | 0,123                             |
| 85                     | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,372}{47,5} = 0,0482 \text{ radians : s}^2.$$

$$C_t = \frac{163,5}{981} \times 0,0482 = 0,008 \text{ cm-g,}$$

$$C_t \text{ minuterie} = 0,008 - 0,0037 = 0,0043 \text{ cm-g.}$$

Le couple de la minuterie neuve et fraîchement huilée étant de 0,0027 cm-g, l'accroissement de frottement dû à la résinification de l'huile est de l'ordre de 60 pour 100.

On voit par les résultats des expériences précédentes que les minuterie dont les roues tangentes sont munies d'axes terminés par des pointes pivotées sont beaucoup moins sensibles au vieillissement que les minuterie du deuxième type. Il est également à noter, à l'avantage des minuterie du premier type, que les contre pointes coniques permettent d'emmagasiner une réserve d'huile relativement importante, ce qui retarde considérablement les effets du dessèchement.

Dans les ampèreheuremètres à grande vitesse, on pourra cependant envisager des huiliers pour le premier et même pour les deux premiers mobiles en raison de leur vitesse de rotation relativement élevée, les autres rouages devant être laissés secs. Mais ces compteurs devront, du fait de leur lubrification, être soumis à des vérifications et à des nettoyages périodiques.

5. **Pression des balais.** — Cette cause de frottement intervient dans les compteurs à courant continu (les compteurs du type Thomson n'étant guère employés sur les réseaux à courant alternatif), le moment du couple étant naturellement fonction de la pression des balais. Les tableaux suivants donnent un exemple d'essais d'un compteur-moteur à collecteur muni d'une minuterie à rouleaux.

*Essai n° 1.* — Compteur à courant continu. — Période d'oscillation propre,  $t_1 = 13,22 \text{ s}$ ; période d'oscillation avec disque additionnel,  $t_2 = 13,82 \text{ s}$ .

Tableau et courbe N, figure 9.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,37                              |
| 30                     | 1,22                              |
| 40                     | 1,176                             |
| 70                     | 1,11                              |
| 80                     | 1,08                              |
| 90                     | 1,05                              |
| 100                    | 0,925                             |
| 130                    | 0,89                              |
| 140                    | 0,85                              |
| 150                    | 0,734                             |
| 180                    | 0,705                             |
| 190                    | 0,68                              |
| 200                    | 0,645                             |
| 210                    | 0,615                             |
| 220                    | 0,580                             |
| 230                    | 0,550                             |
| 240                    | 0,535                             |
| 250                    | 0,50                              |
| 260                    | 0,430                             |
| 270                    | 0,40                              |
| 280                    | 0,375                             |
| 290                    | 0,355                             |
| 310                    | 0,325                             |
| 320                    | 0,306                             |
| 330                    | 0,285                             |
| 340                    | 0,267                             |
| 350                    | 0,252                             |

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 360                    | 0,227                             |
| 370                    | 0,21                              |
| 380                    | 0,19                              |
| 398                    | 0,16                              |
| 411                    | 0,139                             |
| 427                    | 0,111                             |
| 437                    | 0,093                             |
| 465                    | 0,05                              |
| 501                    | 0                                 |

$$K = 65,9 \times \frac{(13,22)}{(13,82) - (13,22)} = 710 \text{ g-cm}^2,$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,232}{151} = 0,00965 \text{ radian : s}^2.$$

Couple dû à l'induit seul,

$$C_i = \frac{0,00965 \times 710}{981} = 0,007 \text{ cm-g.}$$

*Essai n° 2.* — Compteur à courant continu. — Minuterie entraînée (les 5 rouleaux étant en prise), balais relevés.

Tableau et courbe N', figure 9.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,41                              |
| 10                     | 1,28                              |
| 20                     | 1,235                             |
| 30                     | 1,18                              |
| 40                     | 1,125                             |
| 50                     | 1,09                              |
| 60                     | 1,02                              |
| 70                     | 1,00                              |
| 80                     | 0,915                             |
| 90                     | 0,87                              |
| 100                    | 0,83                              |
| 120                    | 0,714                             |
| 130                    | 0,69                              |
| 140                    | 0,645                             |
| 150                    | 0,618                             |
| 160                    | 0,574                             |
| 170                    | 0,550                             |
| 180                    | 0,500                             |
| 190                    | 0,465                             |
| 200                    | 0,445                             |
| 210                    | 0,413                             |
| 220                    | 0,370                             |
| 230                    | 0,340                             |
| 240                    | 0,307                             |
| 250                    | 0,285                             |
| 260                    | 0,250                             |
| 270                    | 0,233                             |
| 280                    | 0,196                             |
| 290                    | 0,170                             |
| 303                    | 0,128                             |
| 355                    | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,26}{501} = 0,0156 \text{ radian : s}^2.$$

Couple dû à l'induit entraînant la minuterie,

$$C_{i0} = \frac{0,0156 \times 710}{981} = 0,0113 \text{ cm-g.}$$

Couple dû à la minuterie,

$$0,0113 - 0,007 = 0,0043 \text{ cm-g.}$$

*Essai n° 3.* — Compteur à courant continu. — Sans minuterie, balais en position.

Tableau et courbe N'', figure 9.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,38                              |
| 10                     | 1,22                              |
| 20                     | 1,13                              |
| 30                     | 1,00                              |
| 40                     | 0,89                              |
| 50                     | 0,77                              |
| 60                     | 0,66                              |
| 70                     | 0,568                             |
| 80                     | 0,476                             |
| 90                     | 0,38                              |
| 102                    | 0,262                             |
| 112                    | 0,171                             |
| 130                    | 0                                 |

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,74}{80} = 0,0581.$$

Couple dû à l'induit avec ses balais,

$$C_i = \frac{0,0581 \times 710}{981} = 0,042 \text{ cm-g.}$$

Couple freinant dû à la pression des balais

$$0,042 - 0,007 = 0,035 \text{ cm-g.}$$

Pour la mesure du couple-moteur de ces compteurs, il ne faut pas oublier que ce couple varie selon la position des sections de l'induit; on devra donc, si on ne dispose pas d'un dispositif enregistreur, faire la mesure du couple dans les différentes positions de l'induit et prendre la valeur moyenne. On voit par cet exemple que, pour les compteurs à courant continu, la valeur des couples de frottement est extrêmement élevée; il s'en suit que, en dépit de leur grand couple moteur, ces compteurs ne présentent en général qu'un facteur organique faible.

**V. Justifications et essais comparatifs.** — Ayant évalué chacun des couples de frottement, la détermination de

$$F = \frac{C_m}{\sum C_f}$$

s'ensuit immédiatement.

La connaissance du « facteur organique » du compteur va nous permettre maintenant d'apprécier ses qualités et surtout de prévoir la conservation de ces qualités dans le temps.

L'arrêté ministériel du 8 janvier 1920 a fixé, pour la France, les conditions exigées pour l'approbation d'un type de compteur. Notre législation, en effet, se contente d'imposer l'examen sévère d'un compteur type et admet implicitement que tous les compteurs de la série auront les mêmes qualités. En particulier, d'après cet arrêté, les courbes d'erreurs doivent être renfermées entre deux lignes limites à écartement variable selon les conditions de fonctionnement. Le compteur doit, en outre, pouvoir démarrer au  $1/20$  de sa charge nominale, si c'est un appareil à courant alternatif et au  $1/100$  de cette charge, si c'est un appareil à courant

continu, la consommation des circuits dérivés ne devant pas dépasser 1,5 w par 100 v pour les appareils à induction et 4 w par 100 v pour les compteurs à courant continu.

Or, sans vouloir mettre en cause le moins du monde la probité des constructeurs, il va de soi que les compteurs livrés au commerce ne pourront jamais être aussi soignés que ceux présentés aux essais officiels d'approbation. D'autre part, si un compteur donne des indications suffisamment exactes au début de son installation, on peut se demander quelle sera la valeur de ces indications au bout de cinq ou même dix années de service.

Les compagnies de distribution perçoivent bien, sous des rubriques diverses, des redevances destinées à payer l'entretien des compteurs; cependant, à part

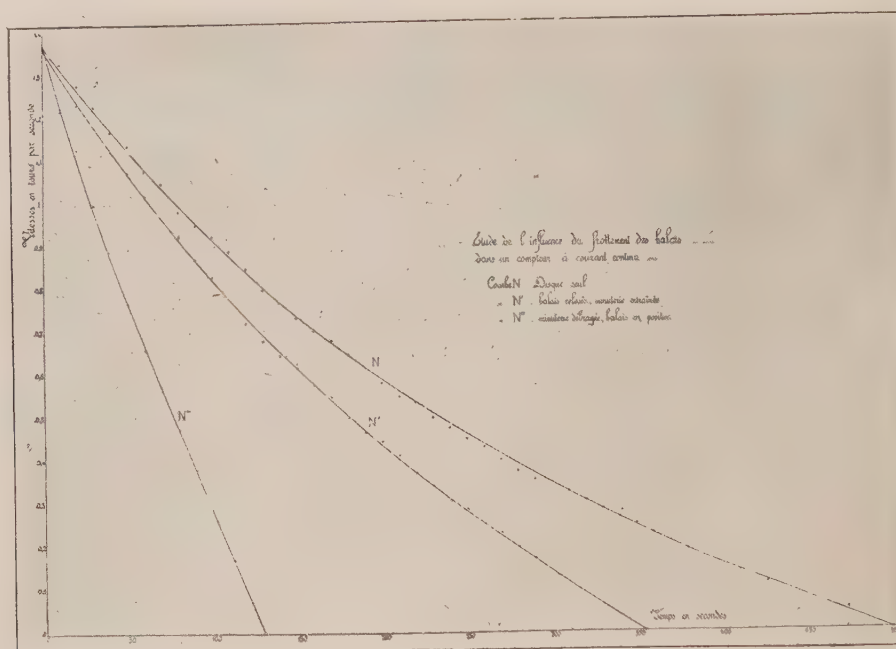


Fig. 9. — Etude de l'influence du frottement des balais dans un compteur à courant continu.

quelques exceptions d'autant plus louables qu'elles sont rarissimes, ces redevances ne constituent que des augmentations déguisées du prix de vente du courant et, en fait, les compteurs sont purement et simplement abandonnés à eux-mêmes.

Or, les qualités d'un compteur se modifient dans le temps.

Si, au point de vue électrique, on peut tenir comme négligeables les changements d'état moléculaires qui viendront modifier à la longue la résistance des enroulements, si même à la rigueur encore on peut admettre que, en raison des progrès réalisés dans la construction et surtout dans le vieillissement artificiel des aimants, le couple freinant des compteurs ne subira pas de diminution appréciable, il n'en va plus de même des qualités d'ordre mécanique qui, en raison de

l'usure des organes, du dessèchement de l'huile, etc..., s'altéreront et viendront insensiblement changer l'allure de la courbe d'étalonnage du compteur aux faibles régimes de charge.

On s'est bien inquiété, il est vrai, d'évaluer les qualités mécaniques des compteurs et l'intention du législateur apparaît dans le fait que la mesure du couple moteur, qui ne figurait pas dans l'arrêté de 1910, a été imposée par l'arrêté de 1920. On a d'ailleurs beaucoup épilogué sur cette question du couple moteur. C'est en effet une erreur manifeste de croire que de la plus ou moins grande valeur du couple moteur dépendra la plus ou moins grande sensibilité de l'appareil. Les compteurs, aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif, sont des appareils qui, en principe, fournissent un travail extérieur nul, et quelle que soit

la valeur donnée au couple, on a, à chaque instant, l'identité :

Couple moteur — couples freinants = 0.

Si le couple moteur croît, il faut augmenter de même les couples freinants.

Ce qu'il nous faut donc considérer, en réalité, c'est l'excès du couple-moteur sur la somme des couples de frottement : plus cet excès sera grand et plus le compteur démarrera facilement. D'autre part, l'examen des divers couples de frottement renseignera sur l'accroissement probable de ces frottements dans le temps. Le frottement de pivotement sera d'autant plus constant que l'acier du pivot sera plus dur et travaillera sous une pression spécifique plus réduite. D'autre part, les frottements de tous les organes mobiles seront d'autant plus constants qu'aucun lubrifiant ne pourra venir en modifier la valeur et que des précautions seront prises pour éviter l'introduction des poussières, etc.

Dans l'étude des couples de frottement, il nous faut distinguer ceux qui agissent exclusivement au démarrage, c'est-à-dire les couples dus aux pivots et à la minuterie.

Naturellement, il faudrait considérer, si l'on envisage la détermination du facteur organique au démarrage, la valeur du couple-moteur pour la charge « administrative » de démarrage, c'est-à-dire pour le  $1/200$  ou le  $1/100$  de la charge nominale, et cette valeur peut-être sensiblement différente (en raison du couple compensateur des frottements) du  $1/200$  ou du  $1/100$  du couple moteur à pleine charge. Comme il est pratiquement très difficile de mesurer la valeur de ce couple au démarrage, nous conviendrons de définir le facteur organique à cette charge : le rapport entre le couple moteur théorique pour la charge administrative de démarrage et la somme des couples de frottement au démarrage.

Il faudrait, en outre, tenir compte de l'action des organes d'arrêt destinés à annuler la marche à vide, et qui contribuent à diminuer la sensibilité au démarrage.

Le compteur sera évidemment d'autant plus sensible que le facteur organique au démarrage sera plus grand, et c'est pourquoi nous préconisons l'introduction de la mesure de ce facteur dans les épreuves administratives d'approbation, puisque l'étude des différents couples de frottement est susceptible de donner une indication sur la conservation dans le temps des qualités du compteur.

Quel que soit l'intérêt que peut présenter l'obtention d'un facteur organique élevé, il ne faut pas oublier que ce résultat peut être acquis aux dépens de la consommation interne de l'appareil ; il faut donc qu'en même temps le compteur présente une consommation interne aussi réduite que possible.

Ayant eu l'occasion d'examiner un très grand nombre de compteurs d'électricité, nous avons été amené à comparer leurs qualités d'ordre électrique et d'ordre mécanique. Si nous désignons par  $\epsilon$  le maximum de l'écart (pour des conditions de fonctionnement déter-

minées, par exemple pour un compteur à induction avec  $\cos \varphi = 1$ ) entre les lignes limites mesurant l'erreur relative entre la puissance vraie et la puissance indiquée et que, d'autre part, nous comparions cette valeur de  $\epsilon$  que nous appellerons « écart caractéristique » aux vitesses de régime, nous remarquons que  $\epsilon$  est d'autant plus petit que la vitesse de régime elle-même est plus réduite. Or, nous avons vu dans cette étude que la réduction de certains couples de frottement était d'autant plus facilitée que la vitesse de régime était elle-même plus petite ; il y a donc concordance entre les conditions à réaliser pour augmenter les qualités électriques et les qualités mécaniques des compteurs à induction.

Si  $n$  est la vitesse nominale, en tours par minute, d'un compteur à induction, le produit

$$\frac{C_m}{C_f} \cdot \frac{1}{n}$$

rendra compte des qualités électriques et mécaniques de l'appareil, étant sous-entendu que ce dernier *satisfait par ailleurs aux conditions administratives*. En outre, l'usure des organes de pivotement, toutes autres choses égales, sera d'autant plus rapide que  $n$  sera plus grand.

Si maintenant nous rapportons ce produit à la consommation interne  $W$  du compteur ( $W$  représentant la consommation du circuit « tension » seul), le produit

$$\frac{C_m}{C_f} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{W}$$

permettra, étant donné un certain nombre de compteurs satisfaisant aux conditions administratives, de déterminer quels seront ceux qui présenteront la plus grande sécurité de marche pour la consommation la plus réduite.

Il est évident qu'il est nécessaire de considérer chacun des termes isolément selon que l'on attribuera plus ou moins d'importance aux qualités d'ordre mécanique ou à celles d'ordre électrique.

Nous avons vu plus haut que, si l'on ne considère que les frottements dus aux pivots, le facteur organique d'un compteur à induction prend au démarrage la forme suivante :

$$F = \frac{C_m}{C_f} = \frac{K P}{K' P^{\frac{4}{3}}} = \frac{k'}{\sqrt[3]{P}}.$$

Autrement dit, étant donné une série de compteurs à induction ayant le même circuit magnétique et des équipages mobiles différents, leur facteur organique est indépendant du couple moteur et inversement proportionnel à la racine cubique du poids de l'équipage.

De tout ce qui précède, il est facile de déduire les conditions optima de fonctionnement d'un compteur, c'est-à-dire :

*Au point de vue mécanique : réduction des frotte-*

ments sans interposition de lubrifiant et accroissement du couple-moteur, ce qui revient à rendre maximum  $C_m$   $\Sigma C_f$ .

*Au point de vue électrique :* réalisation d'un écart caractéristique minimum pour les différentes conditions de fonctionnement, sans préjudice évidemment d'une consommation interne aussi réduite que possible.

Pour les compteurs à induction, dont nous nous sommes occupé principalement dans cette étude, ce sont là des conditions contradictoires et la question ne peut évidemment se résoudre que par un compromis.

On peut, pour améliorer le facteur organique, adopter l'une ou l'autre des deux solutions suivantes :

Ou élever le couple moteur en valeur absolue sans s'inquiéter des couples de frottement ;

Ou bien adopter un couple faible, ce qui permettra de réduire l'écart caractéristique et la consommation interne, et s'attacher à diminuer les couples de frottement.

Enfin, on peut choisir un moyen terme entre ces deux solutions.

Quelle que soit la solution adoptée, la mesure du facteur organique sera un critérium sûr pour juger les qualités d'un appareil.

En résumé, on ne devra donc plus, pour comparer des compteurs entre eux, considérer isolément la mesure du couple moteur, mais toujours la rapporter, non pas au poids de l'équipage mobile (évaluation du facteur de qualité), mais bien aux couples de frottement développés à l'origine dans le système.

Nous avons appliqué cette méthode d'investigation à un certain nombre de compteurs actuellement en usage dans les secteurs français et étrangers.

Afin de tenir compte de l'encrassement des minuteriers, nous avons d'abord essayé les appareils tels que nous les avons reçus des constructeurs, puis les compteurs ont été mis pendant 24 heures dans une chambre close maintenue à 120° C pour opérer le dessèchement de l'huile, ce temps d'épreuve ayant été déterminé empiriquement et par comparaison avec des compteurs ayant deux années de service et placés dans des conditions d'installation aussi parfaites que possible.

Les essais effectués sont indiqués dans les tableaux ci-après, les lettres A, B, C et D désignant des compteurs de construction française et les lettres E, F, G, H et N représentant des compteurs de construction étrangère.

Tous ces compteurs sont du calibre 10 ampères, 110 volts, 50 périodes par seconde, le compteur N étant un appareil à courant continu.

COMPTEUR A. — Disque en aluminium de 95 mm de diamètre, pesant 28 g, serti sur un axe en duralumin ; vis tangente décollée dans la matière de l'arbre.

Etat de la crapaudine (examen au microscope), très bon.

Palier supérieur à aiguille-guide, bien conditionné.

Vitesse de régime, 50 t : mn.

Forme de l'aimant, type Y.

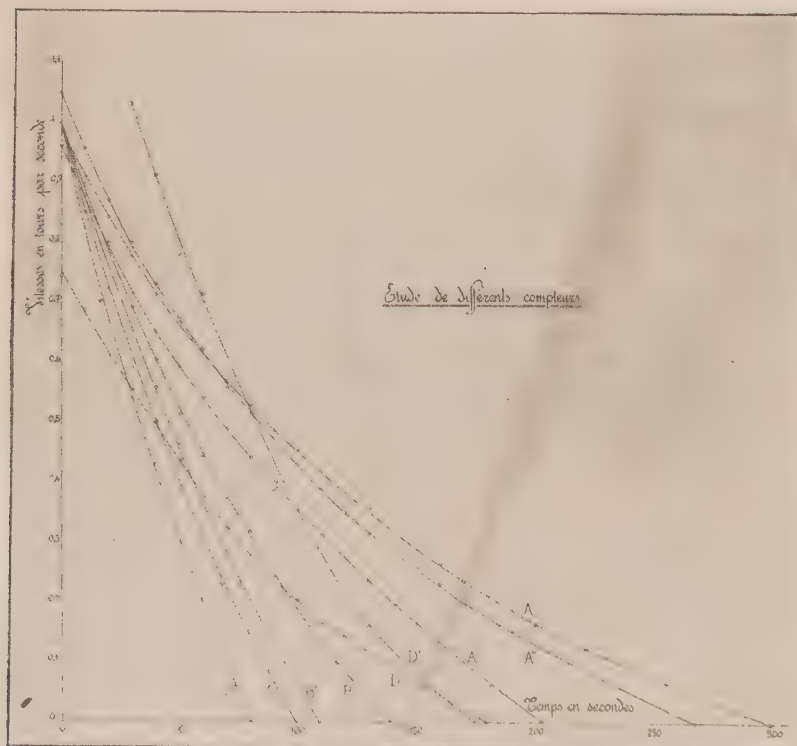


Fig. 10. — Courbes d'essais de différents compteurs.

#### Essai n° 1.

Tableau et courbe A, figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,909                             |
| 20                     | 0,833                             |
| 30                     | 0,787                             |
| 40                     | 0,715                             |
| 50                     | 0,675                             |
| 60                     | 0,606                             |
| 70                     | 0,565                             |
| 80                     | 0,532                             |
| 90                     | 0,483                             |
| 100                    | 0,456                             |
| 110                    | 0,416                             |
| 120                    | 0,385                             |
| 130                    | 0,357                             |
| 140                    | 0,323                             |
| 150                    | 0,286                             |
| 160                    | 0,265                             |
| 170                    | 0,238                             |
| 180                    | 0,213                             |
| 190                    | 0,192                             |
| 200                    | 0,164                             |
| 220                    | 0,1205                            |
| 255                    | 0,068                             |
| 299                    | 0                                 |

Moment d'inertie,

$$t_1 = 8,40 \text{ s}, \quad t_2 = 9,42 \text{ s},$$

$$K = 65,9 \frac{8,40^2}{9,42^2 - 8,40^2} = 253 \text{ g-cm}^2.$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,274}{174} = 0,0099 \text{ radian : s}^2$$

Couple de frottement du disque seul (palier inférieur plus palier supérieur), 0,00255 cm-g.

Couple des pertes dues au frottement du disque dans l'air pour la vitesse de régime, 0,0069 cm-g.

Couple des pertes dues au laminage de l'air dans l'aimant, 0,002 cm-g.

*Essai n° 2.* — La crapaudine de ce compteur étant huilée, nous avons procédé à son dessèchement et recommencé l'essai 1.

Tableau et courbe A'', figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,05                              |
| 10                     | 0,95                              |
| 20                     | 0,87                              |
| 30                     | 0,80                              |
| 40                     | 0,726                             |
| 50                     | 0,666                             |
| 60                     | 0,624                             |
| 70                     | 0,556                             |
| 80                     | 0,512                             |
| 90                     | 0,476                             |
| 100                    | 0,416                             |
| 110                    | 0,385                             |
| 120                    | 0,351                             |
| 130                    | 0,312                             |
| 150                    | 0,256                             |
| 160                    | 0,232                             |
| 173                    | 0,196                             |
| 184                    | 0,159                             |
| 191                    | 0,150                             |
| 206                    | 0,117                             |
| 215                    | 0,0952                            |
| 267                    | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,224}{117} = 0,012,$$

Couple dû au frottement du pivot sur la crapaudine desséchée,

$$(C_f)_0 = \frac{0,012 \times 253}{981} = 0,0031 \text{ cm-g.}$$

(soit une augmentation de 30 pour 100).

*Essai n° 3.*

Tableau et courbe A', figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,96                              |
| 10                     | 0,89                              |
| 20                     | 0,78                              |
| 30                     | 0,714                             |
| 40                     | 0,650                             |
| 50                     | 0,588                             |
| 60                     | 0,526                             |
| 70                     | 0,483                             |
| 80                     | 0,439                             |
| 90                     | 0,382                             |
| 100                    | 0,352                             |
| 110                    | 0,308                             |
| 120                    | 0,275                             |
| 130                    | 0,234                             |
| 143                    | 0,191                             |
| 150                    | 0,1625                            |
| 182                    | 0,0606                            |
| 203                    | 0                                 |

Couple de frottement dû à la minuterie (neuve et fraîchement huilée), 0,0026 cm-g.

Couple de frottement dû à la minuterie desséchée, 0,0045 cm-g.

Consommation des électroaimants de « tension », 0,6 w par 100 v.

Couple moteur à pleine charge, 7,45 cm-g.

Valeur théorique du couple actif au démarrage, 37,25 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage, 7,6 cm-mg.

Facteur organique au démarrage,

$$\left(\frac{C_m}{\Sigma C_f}\right)_{\frac{1}{200}} = \frac{37,25}{7,6} = 4,9.$$

Produit

$$\left(\frac{C_m}{\Sigma C_f}\right)_{\frac{1}{200}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 4,9 \times \frac{1}{50} \times \frac{1}{0,6} = 0,163.$$

COMPTEUR B. — Disque en aluminium de 95 mm de diamètre pesant 30,60 g, monté au moyen d'un moyeu fondu sur un arbre en laiton; vis tangente décollée à même dans l'arbre.

Etat de la crapaudine très bon.

Conditionnement du palier supérieur, médiocre.

*Essai n° 1.*

Tableau et courbe B, figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,87                              |
| 20                     | 0,80                              |
| 30                     | 0,69                              |
| 40                     | 0,605                             |
| 50                     | 0,512                             |

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par secondes) |
|------------------------|------------------------------------|
| 60                     | 0,445                              |
| 70                     | 0,370                              |
| 80                     | 0,318                              |
| 91                     | 0,235                              |
| 107                    | 0,145                              |
| 116                    | 0,10                               |
| 139                    | 0                                  |

Moment d'inertie :

$$t_1 = 8,10 \text{ s} \quad t_2 = 9,15 \text{ s}$$

$$K = 65,9 \times \frac{8,10^2}{9,15^2 - 8,10^2} = 230 \text{ g-cm}^2,$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,26}{64,5} = 0,0249 \text{ radian : s}^2$$

Couple de frottement dû aux paliers,

$$\frac{240}{98} \times 0,0249 = 0,0061 \text{ cm-g.}$$

Couple de frottement dû au palier supérieur seul,  
0,003 cm-g.

Couple de frottement dû à la crapaudine seule,  
0,0031 cm-g.

Couple dû à la résistance de l'air pour la vitesse nominale de 50 t : mn, 0,009 cm-g.

Couple dû au laminage de l'air dans l'aimant (forme Y), 0,002 cm-g.

Essai n° 2. — Détermination des frottements de la minuterie.

Tableau et courbe B', figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,893                             |
| 20                     | 0,793                             |
| 30                     | 0,676                             |
| 40                     | 0,556                             |
| 50                     | 0,465                             |
| 60                     | 0,357                             |
| 75                     | 0,230                             |
| 87                     | 0,140                             |
| 109                    | 0                                 |

Couple de frottement total, 0,010 cm-g.

Couple de frottement dû à la minuterie neuve et fraîchement huilée,

$$0,010 - 0,0061 = 0,0039 \text{ g-cm.}$$

Couple dû à la minuterie après résinification de l'huile, 0,005 cm-g.

Couple-moteur à pleine charge, 6,4 cm-g.

Consommation des électroaimants « tension », 0,96 w par 100 v.

Couple actif théorique pour la valeur administrative de démarrage, 34 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage, 11,1 cm-g.

Facteur organique au démarrage,  $\left(\frac{C_m}{\Sigma C_f}\right)_0 = 3,07$ .

Produit

$$\left(\frac{C_m}{\Sigma C_f}\right)_{\frac{1}{20n}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 0,064.$$

COMPTEUR C. — Disque en aluminium de 85 mm de diamètre pesant 30,43 g, fixé au moyen d'un moyeu fondu sur un axe en laiton; vis sans fin rapportée.

Palier supérieur bien conditionné.

Etat de la crapaudine, mauvais (traces d'abrasifs et de limailles de laiton, pellicule adhérente sur le fond de la creusure).

Essai n° 1. — Frottements des paliers :

Tableau et courbe C, figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,87                              |
| 20                     | 0,74                              |
| 30                     | 0,588                             |
| 40                     | 0,50                              |
| 50                     | 0,385                             |
| 60                     | 0,29                              |
| 68                     | 0,227                             |
| 79                     | 0,151                             |
| 88                     | 0,0808                            |
| 99                     | 0                                 |

Moment d'inertie du disque :

$$t_1 = 6,72 \text{ s} \quad t_2 = 7,96 \text{ s}$$

$$K = 65,9 \times \frac{6,72^2}{7,96^2 - 6,72^2} = 163,5 \text{ g-cm}^2,$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,544}{7,4} = 0,047 \text{ radians : s}^2$$

Couple de frottement dû aux paliers,

$$\frac{163,5}{981} \times 0,047 = 0,0078 \text{ cm-g.}$$

Couple des pertes dues à l'air à la vitesse de régime (50 t : mn), 0,0064 g-cm.

Couple des pertes dues au laminage de l'air dans les aimants (forme Z), 0,006 cm-g.

Essai n° 2.

Tableau et courbe C, figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,832                             |
| 20                     | 0,668                             |
| 30                     | 0,540                             |
| 40                     | 0,415                             |
| 50                     | 0,30                              |
| 59                     | 0,205                             |
| 80                     | 0                                 |

Couple de frottement dû aux paliers et à la minuterie, 0,0105 cm-g.

Couple de frottement dû à la minuterie neuve et fraîchement huilée,

$$0,0105 - 0,0078 = 0,0027 \text{ cm-g.}$$

Couple de frottement de la minuterie après résinification de l'huile, 0,0042 cm-g.

Couple moteur à pleine charge, 5,6 cm-g.

Consommation des électroaimants de « tension », 0,90 w par 100 v.

Couple moteur théorique au démarrage, 28 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage, 11,3 cm-mg.

$$\text{Facteur organique au démarrage, } \frac{28}{11,3} = 2,47.$$

Produit

$$\left( \frac{C_m}{\Sigma C_f} \right)_{\frac{1}{200}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 0,05.$$

COMPTEUR D. — Disque en aluminium de 80 mm de diamètre, monté par sertissage sur un arbre en duralumin; vis sans fin en laiton rapportée sur l'arbre.

Poids de l'équipage mobile, 12,6 g.

Etat de la crapaudine, très bon.

Etat du palier supérieur (dispositif à aiguille), très bon.

Essai n° 1.

Tableau et courbe D, figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 0,74                              |
| 10                     | 0,69                              |
| 20                     | 0,606                             |
| 30                     | 0,556                             |
| 40                     | 0,476                             |
| 50                     | 0,435                             |
| 60                     | 0,370                             |
| 70                     | 0,323                             |
| 80                     | 0,275                             |
| 90                     | 0,233                             |
| 100                    | 0,204                             |
| 110                    | 0,101                             |
| 120                    | 0,142                             |
| 182                    | 0                                 |

Moment d'inertie :

$$t_1 = 4,84 \text{ s} \quad t_2 = 6,42 \text{ s}$$

$$K = 65,9 \frac{(4,84)^2}{(6,42)^2 - (4,84)^2} = 85 \text{ g-cm}^2,$$

Accélération angulaire.

$$\left( \frac{d\omega}{dt} \right)_0 = 2\pi \frac{0,362}{182} = 0,012 \text{ radian : s}^2$$

$$C_f = \frac{2\pi}{981} \times 85 \times \frac{0,362}{182} = 0,00108 \text{ cm-g.}$$

N. B. — L'équipage mobile ayant son centre de gravité plus bas que le point de pivotement et le disque n'ayant aucun balourd décelable, les frottements du palier supérieur sont absolument négligeables.

Couple dû à la résistance de l'air pour la vitesse nominale de 31 t : mn, 0,0021 cm-g.

Couple des pertes dues au laminage de l'air dans l'aimant (forme Y) à la vitesse de régime, 0,0004 cm-g.

Couple moteur à pleine charge, 2,2 cm-g.

Consommation du circuit « tension », 0,29 w par 100 v.

Essai n° 2.

Tableau et courbe D, figure 10.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,60                              |
| 10                     | 1,25                              |
| 20                     | 1,14                              |
| 30                     | 1,03                              |
| 40                     | 0,91                              |
| 50                     | 0,78                              |
| 60                     | 0,714                             |
| 70                     | 0,617                             |
| 80                     | 0,515                             |
| 90                     | 0,40                              |
| 100                    | 0,285                             |
| 110                    | 0,210                             |
| 120                    | 0,179                             |
| 130                    | 0,160                             |
| 175                    | 0                                 |

Accélération angulaire.

$$\left( \frac{d\omega}{dt} \right)_0 = 0,034,$$

Couple de frottement de l'équipage et de la minuterie.

$$C_f = \frac{85 \times 0,034}{981} = 0,0029 \text{ cm-g soit environ } 0,003 \text{ cm-g.}$$

Couple dû à la minuterie.

$$0,003 - 0,00108 = 0,0019 \text{ cm-g.}$$

Cette minuterie n'étant pas huilée et la vitesse du compteur étant très réduite ( $n = 31 \text{ t : mn}$ ), nous admettrons que le couple de frottement reste constant dans le temps.

Couple moteur théorique au démarrage, 11 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage, 2,9 cm-mg.

$$\text{Facteur organique au démarrage, } \frac{11}{2,9} = 3,8.$$

Cette valeur élevée du facteur organique assure un excellent démarrage, malgré la faiblesse relative du couple moteur.

Produit

$$\left( \frac{C_m}{\Sigma C_f} \right)_{\frac{1}{200}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 0,42,$$

COMPTEUR E. — Disque en aluminium de 95 mm de diamètre pesant 34,85 g, monté au moyen d'un alliage fondu sur un arbre en acier.

Crapaudine et palier supérieur très bien conditionnés et en excellent état.  
Essai n° 1.

Tableau et courbe E, figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,91                              |
| 20                     | 0,833                             |
| 30                     | 0,78                              |
| 40                     | 0,712                             |
| 50                     | 0,64                              |
| 60                     | 0,590                             |
| 70                     | 0,55                              |
| 80                     | 0,50                              |
| 90                     | 0,450                             |
| 100                    | 0,40                              |
| 110                    | 0,356                             |
| 120                    | 0,322                             |
| 130                    | 0,274                             |
| 140                    | 0,25                              |
| 150                    | 0,217                             |
| 160                    | 0,191                             |
| 172                    | 0,154                             |
| 180                    | 0,141                             |
| 196                    | 0,103                             |
| 221                    | 0,0575                            |
| 251                    | 0                                 |

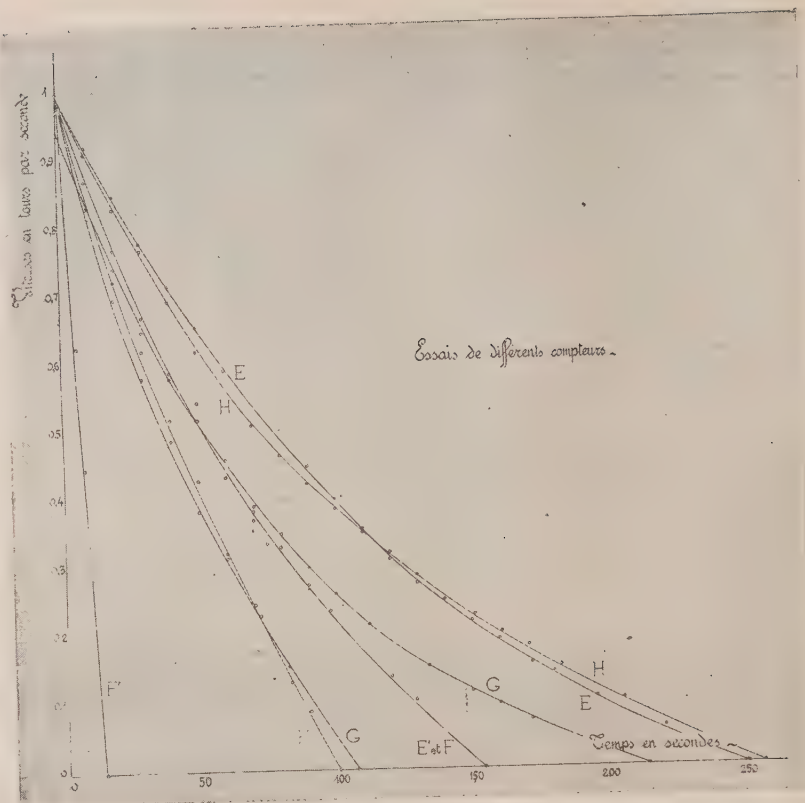


Fig. 11. — Courbes d'essais de différents compteurs.

Moment d'inertie :

$$t_1 = 9,20 \text{ s} \quad t_2 = 10,12 \text{ s}$$

$$K = 65,0 \frac{9,20^2}{10,12^2 - 9,20^2} = 313 \text{ g-cm}^2.$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,282}{151} = 0,0117 \text{ radian : s}^2.$$

Couple de frottement dû aux deux paliers,

$$C_f = \frac{313 \times 0,0117}{981} = 0,00375 \text{ cm-g},$$

à la vitesse de régime (50 t : mn, ou 0,834 t : s).

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{0,83} = 2\pi \times \frac{0,455}{70} = 0,041.$$

Couple freinant dû à l'air et aux paliers.

$$C_{0,83} = \frac{0,041 \times 313}{981} = 0,013 \text{ cm-g}.$$

Couple dû à l'air seul,

$$0,013 - 0,0037 = 0,0093 \text{ cm-g}.$$

Couple freinant dû au laminage de l'air dans l'aimant  
à la vitesse nominale, 0,002 cm-g.

Couple moteur, 5 cm-g.

Consommation de l'électroaimant de « tension, »  
0,7 w par 100 v.

Essai n° 2.

Tableau et courbe E, figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,87                              |
| 20                     | 0,77                              |
| 30                     | 0,666                             |
| 40                     | 0,588                             |
| 50                     | 0,526                             |
| 60                     | 0,46                              |
| 70                     | 0,385                             |
| 80                     | 0,322                             |
| 90                     | 0,274                             |
| 98                     | 0,237                             |
| 120                    | 0,140                             |
| 129                    | 0,104                             |
| 154                    | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,425}{104} = 0,0256 \text{ radian : s}^2$$

Couple total (disque + minuterie),

$$C_t = \frac{313 \times 0,0256}{981} = 0,0082 \text{ cm-g}.$$

Couple dû à la minuterie seule, 0,0044 cm-g.

L'essai a été fait sur un compteur en service depuis deux années; nous avons constaté que les huiliers étaient pratiquement secs.

Couple actif théorique au démarrage, 25 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage, 8,1 cm-mg.

Facteur organique au démarrage,  $\frac{25}{8,1} = 3,1$ ,

Produit

$$\left( \frac{C_m}{\Sigma C_f} \right)_{\frac{1}{200}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 0,098.$$

COMPTEUR F. — Disque en aluminium de 70 mm de diamètre pesant 14 g monté par sertissage sur un axe en laiton.

Etat des paliers inférieur et supérieur, très bon.

Essai n° 1.

Tableau et courbe E, figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,83                              |
| 20                     | 0,714                             |
| 30                     | 0,666                             |
| 40                     | 0,588                             |
| 50                     | 0,526                             |
| 60                     | 0,435                             |
| 70                     | 0,370                             |
| 80                     | 0,333                             |
| 90                     | 0,270                             |
| 101                    | 0,208                             |
| 112                    | 0,156                             |
| 120                    | 0,128                             |
| 129                    | 0,086                             |
| 153                    | 0                                 |

Moment d'inertie :

$$t_1 = 4,17 \text{ s} \quad t_2 = 5,97 \text{ s}$$

$$K = 65,9 \times \frac{4,17^2}{5,97^2 - 4,17^2} = 63 \text{ g-cm}^2.$$

Accélération angulaire,

$$\left( \frac{d\omega}{dt} \right)_0 = \frac{2\pi \times 0,111}{103} = 0,025 \text{ radian : s}^2$$

Couple dû aux paliers seuls,

$$C_{f0} = 0,025 \times \frac{63}{981} = 0,0016 \text{ cm-g.}$$

Couple dû à l'action de l'air sur le disque pour la vitesse nominale de 45 t : mn, 0,0023 cm-g.

Couple dû au laminage, 0,0012 cm-g.

Couple moteur, 5,3 cm-g.

Consommation de l'électroaimant de « tension », 1,65 w par 100 v.

Essai n° 2. — Tableau et courbe F', figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 6                      | 0,628                             |
| 8                      | 0,428                             |
| 11                     | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left( \frac{d\omega}{dt} \right)_0 = \frac{1}{13} \times 2\pi = 0,483 \text{ radian : s}^2$$

Couple total dû au disque et à la minuterie,

$$C_{fp+m} = 0,483 \times \frac{63}{981} = 0,030 \text{ cm-g.}$$

Couple dû à la minuterie,

$$0,030 - 0,0016 = 0,028 \text{ cm-g.}$$

valeur évidemment très élevée due aux erreurs de conception et d'exécution de cette minuterie.

Couple actif théorique au démarrage, 26,5 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage 29,6 cm-mg.

Facteur organique au démarrage,  $\frac{26,5}{29,6} = 0,9$ .

Comme on pouvait s'y attendre d'ailleurs, puisque le facteur organique est plus petit que l'unité, le compteur est incapable de démarrer au 1/2000<sup>e</sup> de la charge nominale.

Produit

$$\left( \frac{C_m}{\Sigma C_f} \right)_{\frac{1}{2000}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 0,0135.$$

COMPTEUR G. — Disque en aluminium de 100 mm de diamètre pesant 12 g, monté au moyen d'un moyen fondu sur un arbre en acier.

Etat du palier inférieur, bon.

Etat du palier supérieur, assez bon.

Essai n° 1. — Tableau et courbe G, figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,83                              |
| 20                     | 0,74                              |
| 30                     | 0,65                              |
| 40                     | 0,58                              |
| 50                     | 0,52                              |
| 60                     | 0,45                              |
| 70                     | 0,39                              |
| 80                     | 0,35                              |
| 90                     | 0,30                              |
| 100                    | 0,26                              |
| 112                    | 0,217                             |
| 122                    | 0,183                             |
| 134                    | 0,152                             |
| 150                    | 0,113                             |
| 160                    | 0,095                             |
| 172                    | 0,07                              |
| 215                    | 0                                 |

Moment d'inertie :

$$t_1 = 6,14 \text{ s} \quad t_2 = 7,45 \text{ s}$$

$$K = 65,9 \frac{6,14^2}{7,45^2 - 6,14^2} = 139,5 \text{ g-cm}^2.$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = \frac{0,193}{115} \times 2\pi = 0,0105 \text{ radian : s}^2$$

Couple dû aux paliers,

$$C_f = \frac{139,5 \times 0,0105}{981} = 0,0015 \text{ cm-g},$$

valeur très faible comme on pouvait s'y attendre du fait du poids réduit de l'équipage.

En raison des stries imprimées dans le disque et du grand diamètre de ce dernier, l'influence de l'air devient très sensible à partir de  $n = 0,20 \text{ t : s}$ .

A la vitesse de régime (30 t : mn ou 0,5 t : s), on a

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{0,5} = 2\pi \frac{0,34}{51} = 0,042;$$

d'où un couple total

$$(C_f)_{0,5} = \frac{139,5 \times 0,042}{981} = 0,006 \text{ cm-g}$$

et un couple dû à l'air de 0,0045 cm-g, valeur évidemment très élevée.

Essai n° 2. — Tableau et courbe G', figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,90                              |
| 20                     | 0,710                             |
| 30                     | 0,582                             |
| 40                     | 0,49                              |
| 50                     | 0,385                             |
| 60                     | 0,318                             |
| 72                     | 0,23                              |
| 82                     | 0,155                             |
| 90                     | 0,091                             |
| 107                    | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,51}{81} = 0,0395, \text{ radian : s}^2$$

Couple total dû au disque et à la minuterie,

$$C_f = \frac{139,5 \times 0,0395}{981} = 0,0056 \text{ cm-g}.$$

Couple dû à la minuterie,

$$0,0056 - 0,0015 = 0,0041 \text{ cm-g}.$$

Cette minuterie n'étant pas huilée, on n'a pas procédé à son étuvage.

Couple moteur, 2,8 cm-g.

Consommation de l'électroaimant de « tension », 1,29 w par 100 v.

Couple actif théorique au démarrage, 14 cm-mg.

Somme  $\Sigma$  des couples de frottement au démarrage, 5,6 cm-mg.

Facteur organique au démarrage,  $\frac{14}{5,6} = 2,5$ .

Produit

$$\left(\frac{C_m}{\Sigma C_f}\right) \frac{1}{200} \times \frac{1}{W} \times \frac{1}{n} = 0,064.$$

COMPTEUR H. — Disque en aluminium comportant deux lignes de gaufrage.

Diamètre 105 mm; poids 35,20 g; le disque est monté sur un arbre en acier par l'intermédiaire d'un moyeu fondu tourné après coulée.

Vis sans fin en laiton rapportée sur l'arbre.

Etat de la crapaudine, très bon.

Etat du palier supérieur, bon.

Minuterie à rouleaux.

Essai n° 1. — Tableau et courbe H, figure 11.

Tableau et courbe H, figure 11.

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,905                             |
| 20                     | 0,830                             |
| 30                     | 0,770                             |
| 40                     | 0,695                             |
| 50                     | 0,620                             |
| 60                     | 0,582                             |
| 70                     | 0,510                             |
| 80                     | 0,465                             |
| 90                     | 0,425                             |
| 100                    | 0,385                             |
| 110                    | 0,350                             |
| 120                    | 0,310                             |
| 130                    | 0,285                             |
| 140                    | 0,25                              |
| 151                    | 0,227                             |
| 161                    | 0,200                             |
| 171                    | 0,180                             |
| 183                    | 0,150                             |
| 206                    | 0,10                              |
| 257                    | 0                                 |

Moment d'inertie :

$$t_1 = 9,34 \text{ s} \quad t_2 = 10,28 \text{ s}$$

$$K = 65,9 \frac{9,34^2}{10,28^2 - 9,34^2} = 311 \text{ g-cm}^2,$$

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{160}{82} = 0,0122 \text{ radian : s}^2$$

$$C_f = \frac{311}{981} \times 0,0122 = 0,004 \text{ cm-g}.$$

En raison des deux lignes de gaufrage, dont le relief sur le plan du disque est très appréciable, la résistance due à l'air est relativement importante.

A la vitesse de régime (0,5 t/s), on a, pour l'accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{0,5} = 2\pi \frac{0,37}{71} = 0,0134 \text{ radian : s}^2$$

d'où un couple total de frottement

$$C_f = \frac{0,0314 \times 311}{981} = 0,010 \text{ cm-g.}$$

Le couple dû à l'air est égal à 0,006 cm-g, soit une valeur supérieure à celle que présentent, pour la même vitesse, les autres compteurs à disque lisse.

*Essai n° 2.* — Essai avec minuterie (5 rouleaux en prise).

*Tableau et courbe H', figure 11.*

| Temps<br>(en secondes) | Vitesse<br>(en tours par seconde) |
|------------------------|-----------------------------------|
| 0                      | 1,00                              |
| 10                     | 0,87                              |
| 20                     | 0,725                             |
| 30                     | 0,625                             |
| 40                     | 0,520                             |
| 50                     | 0,430                             |
| 60                     | 0,323                             |
| 70                     | 0,244                             |
| 83                     | 0,131                             |
| 100                    | 0                                 |

Accélération angulaire,

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_0 = 2\pi \frac{0,20}{25} = 0,0502 \text{ radian : s}^2$$

Couple total (disque + minuterie),

$$C_t = \frac{311}{98} \times 0,0502 = 0,0156 \text{ cm-g.}$$

Couple dû à la minuterie,

$$0,0156 - 0,004 = 0,011 \text{ cm-g.}$$

Couple moteur, 4,6 cm-g,

Consommation de l'électroaimant de « tension », 0,7 w par 100 v.

Couple actif théorique au démarrage, 23 cm-g.

Somme des couples de frottement au démarrage, 15 : 6 cm-g.

Facteur organique au démarrage,  $\frac{23}{15,6} = 1,47$ .

Produit

$$\left(\frac{C_m}{\Sigma C_f}\right)_{\frac{1}{200}} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{W} = 0,06,$$

Nous avons résumé dans le tableau suivant les principaux résultats des essais effectués sur les compteurs A, B, C, D, E, F, G, H.

TABLEAU RÉCAPITULATIF.

| COMPTEURS | VITESSE<br>de régime,<br>en tours<br>par minute | POIDS<br>de<br>l'équipage,<br>en<br>grammes | COUPLE MOTEUR<br>théorique<br>au<br>démarrage<br>1/200<br>du<br>couple moteur<br>en cm-mg | $\Sigma$ DES COUPLES<br>de<br>frottement<br>au<br>démarrage,<br>en<br>cm mg | FACTEUR<br>organique<br>au<br>démarrage | CONSOMMATION<br>du<br>circuit<br>par 100 volts,<br>en watts | PRODUIT<br>$\frac{(C_m)}{\Sigma C_f} \frac{1}{W}$ |
|-----------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| A .....   | 50                                              | 28                                          | 37,05                                                                                     | 7,6                                                                         | 4,9                                     | 0,60                                                        | 8,17                                              |
| B .....   | 50                                              | 30,6                                        | 32                                                                                        | 11,1                                                                        | 2,99                                    | 0,96                                                        | 3,007                                             |
| C .....   | 50                                              | 30,43                                       | 28                                                                                        | 11,3                                                                        | 2,47                                    | 0,90                                                        | 2,5                                               |
| D .....   | 51                                              | 19,6                                        | 11                                                                                        | 2,9                                                                         | 3,8                                     | 0,99                                                        | 13                                                |
| E .....   | 50                                              | 34,85                                       | 25                                                                                        | 8,1                                                                         | 3,1                                     | 0,70                                                        | 4,92                                              |
| F .....   | 40                                              | 14                                          | 26,5                                                                                      | 29,6                                                                        | 0,9                                     | 1,65                                                        | 0,54                                              |
| G .....   | 30                                              | 12                                          | 14                                                                                        | 5,6                                                                         | 2,5                                     | 1,29                                                        | 1,93                                              |
| H .....   | 30                                              | 35,2                                        | 23                                                                                        | 15,6                                                                        | 1,47                                    | 0,70                                                        | 2,1                                               |

**VI Conclusions générales.** — Nous tirerons de cette étude les conclusions suivantes :

1° Il est possible, par une construction soignée et une étude rationnelle de tous les organes de pivotement, de réaliser des compteurs à couple faible et à facteur organique élevé ;

2° Les compteurs à couple moteur élevé ne sont pas toujours les plus sensibles, ni ceux qui présentent le meilleur facteur organique ;

3° Enfin, nous ajouterons pour terminer que nous avons pu relever dans les appareils de construction française un progrès très sensible sur les fabrications d'avant-guerre, et nous sommes heureux de constater qu'un certain nombre de compteurs français peuvent aujourd'hui, avantageusement, être comparés aux appareils de construction étrangère.

---

## DEUXIÈME THÈSE

---

Proposition donnée par la Faculté :

### Recherches sur le frottement et la cohésion

VU ET APPROUVÉ :

Nancy le 25 mars 1924.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

*Signé* : PETIT.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER .

Nancy le 26 mars 1924.

Le Recteur de l'Académie de Nancy,

*Signé* : CH. ADAM.

Membre de l'Institut.





